

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

**НОВЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРА
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 64 (124)

СТАНД. СГНЗ
МОСКВА — Д. Д. ЛЬВГРАД

1982



ВВЕДЕНИЕ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

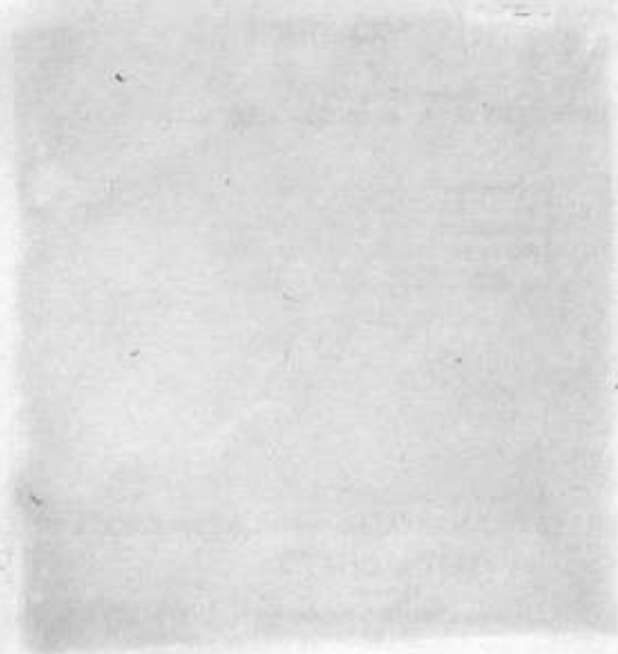
ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

ВЫВОДЫ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ



12.792

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

н 12793

НОВЫЕ МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 64 (124)

Под редакцией
чл.-корр. АН УССР проф. А. Д. НЕСТЕРЕНКО

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-исследовательского
института метрологии
имени Д. И. Менделеева

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
СТАНДАРТГИЗ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1962

ТРУДЫ СОВЕЩАНИЯ ПО НОВЫМ МЕТОДАМ
И АППАРАТУРЕ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Б. 1959/1

Ответственный редактор
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрый рост производства ферромагнитных материалов (электротехнические стали, прецизионные сплавы, стали для постоянных магнитов, ферриты, магнитодиэлектрики и т. д.) и бурное развитие таких отраслей техники, как автоматика, счетно-решающая техника, радиоэлектроника и др., делают весьма актуальным вопрос об оценке качества магнитных материалов и изделий из них. В связи с этим очевидна огромная роль методики и аппаратуры для производства магнитных измерений с точностью, удовлетворяющей запросы народного хозяйства, и с минимальной затратой времени.

Настоящий сборник содержит тексты докладов и сообщений, сделанных на совещании по новым методам и аппаратуре для испытания ферромагнитных материалов, состоявшемся в марте 1961 г. в Ленинграде. Совещание было организовано Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии имени Д. И. Менделеева, Ленинградским и Украинским отделениями НТО приборостроительной промышленности, Научным советом по проблеме «Физика магнитных явлений» АН СССР и Ленинградским домом научно-технической пропаганды.

В большинстве докладов изложены материалы, относящиеся к работам последних лет, которые публикуются впервые. Остальные же вопросы, ранее освещенные в печати или докладах, рассмотрены под определенным углом зрения, а именно: применительно к метрологической оценке аппаратуры для испытания ферромагнитных материалов и возможности ее широкого использования как в лабораторных, так и в производственных условиях при массовом контроле.

По своей тематике все доклады могут быть разбиты на несколько групп.

Один цикл докладов посвящен вопросам стандартизации методов и аппаратуры для магнитных измерений в нормативных документах (как отечественных, так и зарубежных) и выбору характеристик, описывающих поведение ферромагнитного материала в различных условиях его намагничивания.

В докладах представителей завода «Точэлектроприбор» рассмотрена аппаратура для магнитных измерений, уже освоенная заводом

для серийного выпуска в течение последних лет и находящаяся в стадии разработки.

Отдельную группу составляют доклады, относящиеся к испытаниям магнитных материалов в статическом режиме (на постоянном токе) с использованием измерителей Холла и, в частности, к вопросу автоматизации аппаратуры для разбраковки постоянных магнитов на специализированных предприятиях.

Большое внимание уделено испытаниям материалов осциллографическим методом и разработке соответствующей аппаратуры.

Для измерения параметров таких высокочастотных магнитных материалов, как ферриты и магнитодиэлектрики, предложен ряд методов и приборов, позволяющих производить испытания в широком диапазоне частот (вплоть до сотен мегагерц).

Вопросам испытания ферритов и ферромагнитных пленок в импульсном режиме намагничивания посвящена большая группа докладов представителей Института точной механики и вычислительной техники АН СССР и других организаций.

Материалы настоящего сборника представляют интерес для инженерно-технических работников, занимающихся испытаниями ферромагнитных материалов в научно-исследовательских институтах и промышленных предприятиях.

Редактор

Е. Г. ШРАМКОВ

ЗАДАЧИ, СВЯЗАННЫЕ С ОЦЕНКОЙ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В научном и техническом прогрессе материалы с особыми физическими свойствами играют исключительно важную роль. Не последнее место среди таких материалов занимают магнитные материалы во всем их многообразии. Успехи в различных областях техники и, в первую очередь, электротехники, в частности, в области автоматизации, телемеханики, счетно-решающей и электроизмерительной технике, в значительной мере обязаны магнитным материалам с их специфическими магнитными свойствами.

Нет необходимости это положение обосновывать — оно очевидно. Достаточно привести один пример, относящийся к настоящему времени. Речь идет о тех маленьких ферритовых колечках, которые благодаря их особым магнитным свойствам позволяют так изящно и просто решать проблемы вычислительной техники. В Советском Союзе разработана и практически применяется большая номенклатура магнитных материалов с самыми различными магнитными характеристиками. Условия применения этих материалов в разного рода механизмах, приборах и устройствах крайне разнообразны. Промышленность и наука предъявляют все новые, усложненные требования к характеристикам магнитных материалов. Перед промышленностью и наукой стоят следующие задачи:

1) обеспечение производства высококачественных магнитных материалов с различными магнитными свойствами и непрерывное их совершенствование;

2) разработка новых материалов с магнитными свойствами, не только улучшенными по сравнению с существующими, но и с резко отличными от них;

3) наиболее эффективное использование магнитных материалов при расчетах и конструировании всевозможного рода электромагнитных устройств.

При решении всех этих задач в соответствии с современными требованиями приходится иметь дело с оценкой поведения материала в тех или иных эксплуатационных условиях, т. е. с магнитными характеристиками. Здесь нам необходимо прежде всего научиться говорить на одном языке, т. е. разработать единую, унифицированную терминологию, относящуюся к магнитным характеристикам материалов.

За последние годы получили практическое применение новые виды магнитных материалов, чрезвычайно расширились области и условия их применения. Это вызвало необходимость учета новых параметров, характеризующих материал или изделие при разных условиях намагничивания.

Возникли новые термины, не во всех случаях достаточно удачные, чтобы получить всеобщее признание. Особенно расширились области применения магнитных материалов при намагничивании в переменных магнитных полях широкого диапазона частот, а также при импульсном намагничивании.

Таким образом, возникла потребность в новых характеристиках и соответствующих терминах, описывающих поведение материала в этих условиях. Появились такие термины, как коэрцитивная сила в динамическом режиме, остаточная индукция в динамическом режиме, динамическая гистерезисная петля, импульсная петля перемагничивания, различного рода коэффициенты (например, коэффициент выпуклости, коэффициент прямоугольности, характеризующие форму гистерезисных петель), а также термины, характеризующие параметры магнитного материала в изделии (например, зависимость амплитуд выходного сигнала и сигнала помехи от напряженности магнитного поля для магнитных сердечников переключающих устройств, работающих в импульсном режиме, и т. д.).

Возникает необходимость унифицирования терминологии, определений и обозначений, относящихся к магнитным характеристикам материалов.

Существующий ОСТ 6896 «Основные термины и определения в области ферромагнитных явлений» устарел и требует коренной переработки.

Работа по упорядочению терминологии в области магнитных характеристик тесно связана с другими весьма важными вопросами — установления параметров, характеризующих материал в различных условиях эксплуатации. К этим вопросам необходимо подходить с разных позиций: установления параметров, по которым должны проводиться приемо-сдаточные испытания, параметров, достаточно определенно и однозначно описывающих поведение материала при различных условиях намагничивания (что необходимо, в первую очередь, для расчетов и конструирования электромагнитных устройств и при научных исследованиях в области изыскания новых материалов и теории магнетизма), а также параметров для производственного контроля.

Вторая группа вопросов касается нормативных документов на магнитные материалы в части методики и аппаратуры для испытания этих материалов.

Нормативные документы, в первую очередь ГОСТ, в нашей стране должны рассматриваться как в высокой степени прогрессивные документы, не только фиксирующие уже достигнутый уровень, но и стимулирующие повышение качества стандартизуемой продукции.

Необходимо стремиться к тому, чтобы заводы-изготовители отвечали за качество выпускаемой ими продукции по всесторонним показателям, отнюдь не обязательно входящим в число контролируемых при приемо-сдаточных испытаниях.

Третья, важнейшая группа вопросов касается собственно магнитоизмерительной аппаратуры и методики испытаний магнитных материалов.

Здесь, как нам кажется, следует сосредоточить внимание на трех видах аппаратуры в зависимости от ее назначения:

- 1) для приемо-сдаточных испытаний в соответствии с условиями ГОСТ;
- 2) для научно-исследовательских работ;
- 3) для текущего производственного контроля на отдельных стадиях производства, а также готовой продукции.

К сожалению, дело обстоит здесь далеко не блестяще по всем трем видам аппаратуры, несмотря на то, что за последние годы научно-исследовательские организации и промышленные предприятия имеют успехи в создании магнитоизмерительной аппаратуры, в частности, имеются отдельные разработки и по автоматизированному производственному контролю. Институт физики металлов АН СССР совместно с Верх-Исетским заводом разработал аппаратуру для автоматизированного контроля целых листов электротехнической стали; Новочеркасским политехническим институтом совместно с Новочеркасским заводом постоянных магнитов создан автомат для разбраковки постоянных магнитов. Однако как по номенклатуре, так и по количеству изготавливаемой магнитоизмерительной аппаратуры потребности промышленности и науки удовлетворяются в крайне незначительной степени.

Не нужно забывать, что от оснащенности измерительной аппаратурой зависит во многом успех выпуска высококачественных материалов и изыскание новых материалов. Причем эта аппаратура должна удовлетворять непрерывно растущим потребностям в отношении возможностей определения именно тех параметров и в тех условиях, которые задаются требованиями практики или научных исследований. Эти требования весьма многообразны как в отношении рода намагничивающего поля, разрешающей способности по частоте, по амплитуде измеряемых величин, формы кривых переменного поля и пр., так и в отношении точности.

Самым печальным является тот факт, что технической политикой в этой области измерительной техники повседневно никто не занимается, промышленное производство весьма ограничено и заинтересованные организации принуждены как-то решать вопрос с аппаратурой самостоятельно, применительно к тем частным задачам, которые стоят перед данной организацией.

Требуется принять решительные меры для исправления этого положения, коренным образом изменив его.

Необходимо также, чтобы метрологические организации (Комитет стандартов, мер и измерительных приборов, включая и его институты) взяли бы на себя руководящую роль в вопросах, связанных с методикой и аппаратурой, необходимой для исследовательских работ.

Это, в первую очередь, касается разработки методики и аппаратуры для контроля нормальных образцов магнитных материалов в различных условиях намагничивания.

Нам представляется, что в дальнейшем требования практики о наличии нормальных образцов будут возрастать.

Наряду с этим в ряде случаев вопросы автоматического контроля в производственном процессе проще могут быть решены также с использованием нормальных образцов.

Последнему вопросу — аппаратуре для автоматического контроля должно быть уделено особое внимание.

Можно предположить, что вышеотмеченные три группы вопросов, которые в обобщенной формулировке выглядят таким образом: унификация магнитных характеристик, развитие нормативной документации

в определенных направлениях и обеспечение магнитоизмерительной аппаратурой науки и промышленности, являются важнейшими. Рациональное разрешение этих проблем должно дать желаемый эффект в деле удовлетворения потребностей народного хозяйства в магнитоизмерительной аппаратуре, отвечающей современным требованиям.

Основная задача научно-технической общественности заключается в том, чтобы на основании обсуждения докладов выработать такие рекомендации научного, технического и организационного характера, которые касались бы принципиальных вопросов и ориентировали в необходимых направлениях развитие данной области измерительной техники, т. е. содействовали бы техническому прогрессу этой области.

Н. Г. ЧЕРНЫШЕВА

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И АППАРАТУРА В ГОСТ НА МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В статье рассматриваются вопросы стандартизации магнитных материалов и методов их испытаний.

Задачей любого стандарта, в том числе и стандарта на магнитные материалы, является установление единых норм и требований, предъявляемых к материалам или готовым изделиям.

На основании этих документов, как известно, осуществляется контроль продукции при приемо-сдаточных испытаниях, поэтому неотъемлемой частью стандарта должен являться раздел, относящийся к методике проведения этого контроля. Необходимо подчеркнуть также, что одной из главнейших задач стандарта является стимулирование повышения качества стандартизуемой продукции.

В соответствии с этим при разработке стандарта необходимо обращать особо серьезное внимание на выбор основных характеристик оценки качества того или иного материала, в частности, ферромагнитных материалов. Иногда имеет место кажущееся противоречие между заводами, изготовляющими ферромагнитные материалы, и многочисленными и весьма разнообразными потребителями их продукции.

Завод-изготовитель не имеет возможности (да в этом нет и необходимости) проводить контроль своей продукции по большому числу характеристик, интересующих потребителей, так как это требует большого времени, а в ряде случаев затрудняется и отсутствием на заводах необходимой измерительной аппаратуры.

У потребителей же магнитный материал применяется в весьма разнообразных условиях работы (частоты намагничивающего тока, режима намагничивания, величины напряженности магнитного поля и т. п.). В связи с этим вполне законными являются их требования получения характеристик материала в условиях, близких к условиям его эксплуатации в том или ином электромагнитном устройстве.

Решить этот вопрос, как нам кажется, можно следующим образом. Для приемо-сдаточных испытаний должно быть выбрано минимальное число характеристик и к вопросу о выборе этих параметров при разработке ГОСТ должно быть привлечено особое внимание специалистов.

До последнего времени институтам системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов поручалось обычно добавить методическую часть при обсуждении последней редакции ГОСТ, когда характе-

ристики, подлежащие контролю, уже выбраны. Этот порядок, в свете высказанных соображений, в дальнейшем должен быть изменен.

Наряду с этим, заводы-изготовители (с привлечением соответствующих научно-исследовательских институтов и предприятий) должны издавать каталоги, исчерпывающим образом характеризующие выпускаемые ими материалы.

В этом отношении следует приветствовать инициативу ряда институтов, например, Института прецизионных сплавов ЦНИИЧМ, Института точной механики и вычислительной техники АН СССР и др., которые публикуют в своих трудах подобные материалы. Следует, однако, систематизировать эту работу и организовать регулярный выпуск таких справочных данных в виде отдельных каталогов, а не только наряду с публикацией результатов научно-исследовательских работ в трудах соответствующих институтов.

В каталогах должны быть указаны не только усредненные характеристики выпускаемых марок материалов, полученные на основании статистической обработки, но и пределы возможных отклонений от них. Каталоги должны содержать также указание об измерительной аппаратуре и методике определения приведенных в них характеристик.

Издание подобных систематизированных материалов значительно облегчит работу расчетчиков и конструкторов и избавит заводы-изготовители от излишней работы по повседневному контролю своей продукции по большому числу характеристик.

Отсутствием разграничения характеристик материалов при приемодаточных испытаниях и характеристик, определяющих поведение материала в различных условиях его эксплуатации, может, очевидно, частично быть объяснена задержка выпуска некоторых ГОСТ (так, например, третья редакция проекта ГОСТ на магнитномягкие железоникелевые и железокобальтовые сплавы обсуждалась еще в 1959 г., но ГОСТ до сих пор не утвержден).

По этой же причине, по-видимому, задержится выпуск ГОСТ на ленту холоднокатаную рулонную из электротехнической стали.

Остановимся на вопросе о структуре ГОСТ на магнитные материалы в части, касающейся методики и аппаратуры для магнитных испытаний.

ВНИИМ не считает необходимым издавать отдельные специальные ГОСТ на испытания магнитных материалов подобно тому, как это сделано, например, в документах, издаваемых ASTM в США и в Чехословакии. Нам кажется более целесообразным иметь в каждом ГОСТ на ферромагнитные материалы, в котором магнитные характеристики являются основными браковочными признаками, достаточно широко развитый раздел, посвященный аппаратуре и методике измерений.

В связи с весьма ограниченным выпуском (как по количеству, так и по номенклатуре) аппаратуры для испытания магнитных материалов, вряд ли возможно и целесообразно в настоящее время стандартизовать определенный тип аппаратуры в каждом отдельном стандарте.

Необходимо лишь указать, что применяемая для контроля по ГОСТ аппаратура должна обеспечить возможность определения указанных в ГОСТ характеристик и быть поверенной в соответствующих органах Комитета стандартов, мер и измерительных приборов. Особо следует подчеркнуть необходимость иметь в ГОСТ указание на допустимые при определении магнитных характеристик погрешности.

Рассмотрим состояние вопроса со стандартами на магнитные материалы в Советском Союзе и в зарубежных странах.

Большинство ГОСТ на ферромагнитные материалы содержит в той или иной мере развитый раздел об аппаратуре и методике измерений, применительно к контролю материалов по данному ГОСТ.

Наиболее полно представлены стандарты на листовые электротехнические стали. Большая работа по систематизации этих ГОСТ проведена Институтом прецизионных сплавов ЦНИИЧМ.

Отечественные стандарты на магнитные материалы (металлы) представлены следующим образом.

Магнитотвердые материалы

Существовали до последнего времени ГОСТ 4402—48 на магниты постоянные для авиационных магнето и приборов (ални, алниси, алнико) и ОСТ 3543—37 «Сталь магнитная сортовая» (хромистая, вольфрамовая и кобальтовая стали). ГОСТ эти устарели и не охватывают многих материалов, используемых в настоящее время практикой.

С 1961 г. вступил в силу ГОСТ 9575—60, разработанный ВНИИЭП. Следует отметить, как положительный момент, наличие указания в нем погрешности определения основных характеристик (B_r , H_c) материала.

Магнитномягкие материалы

Низкоуглеродистая электротехническая сталь (армко). В настоящее время действует ГОСТ 3836—47 (H_c , B_5 — B_{500} , μ_{max}) и ТУ 1004—55. В 1959 г. заводом «Серп и молот» совместно с ЦНИИЧМ разработан проект нового ГОСТ и направлен в Комитет стандартов.

Сталь электротехническая тонколистовая. Существует ГОСТ 802—58, требующий пересмотра в части, касающейся методики определения магнитных характеристик.

Ленинградским сталепрокатным заводом разработан проект ГОСТ на ленту холоднокатаную рулонную из электротехнической стали.

В некоторой части эти два ГОСТ дублируют друг друга и с этой точки зрения также целесообразно пересмотреть в ближайшее время ГОСТ 802—58.

В 1960 г. проект ГОСТ на ленту холоднокатаную рулонную был направлен в Комитет стандартов, причем в протоколе совещания при обсуждении последней редакции этого проекта указывалось требование потребителей иметь в ГОСТ характеристики материала при частотах выше 400 гц (1000, 2400 гц и т. д.) и в области более слабых магнитных полей, чем это предусмотрено ГОСТ. Однако завод-поставщик не имеет аппаратуры для определения требуемых характеристик и даже после ее получения должен будет затратить определенное время на накопление соответствующего статистического материала для внесения его в ГОСТ.

Магнитномягкие железоникелевые и железокобальтовые сплавы. В настоящее время действуют технические условия ЧМТУ 5010—55. В 1959 г. взамен их разработан ЦНИИЧМ и направлен в Комитет стандартов проект ГОСТ, в котором практически отсутствует раздел методики испытания материала по магнитным параметрам. Характеристики материала (с толщиной проката до 20 мк) приведены лишь применительно к статическому режиму (μ_a , μ_{max} , H_c , B_s , $\frac{B_r}{B_s}$).

Слабмагнитные материалы

В качестве примера одного из ГОСТ на слабмагнитные материалы можно назвать ГОСТ 9124—59 (проволока стальная луженая бандажная), разработанный Ленинградским листопрокатным заводом. Методика определения проницаемости ($\mu \approx 1,1$), единственного браковочного признака, вообще отсутствует и лишь указано, что проверка производится баллистическим методом.

В отношении стандартизации порошковых ферромагнитных материалов (магнитодиэлектрики и ферриты), нашедших широкое распространение, особенно в технике связи, радиотехнике, автоматике и тепломеханике, положение нельзя признать нормальным.

Отечественные стандарты на материалы этой группы вообще отсутствуют, и контроль качества продукции ведется по ведомственным нормам и техническим условиям.

В 1960 г. разработан проект стандарта на железо карбональное, порошковое, радиотехническое взамен временных технических условий № 1024—54. Отсутствие достаточно разработанной методической части в данном проекте стандарта и соответствующей аппаратуры для контроля этой продукции не дает возможности утвердить этот проект.

В самое последнее время подготовлена межведомственная норма на оксидные магнитномягкие материалы (ферриты), в которой наряду с параметрами, подлежащими обязательной проверке (μ_a , $T_K\mu$, $\frac{1g\delta}{\mu_a}$, $\frac{\delta_h}{\mu_a^2}$ при $H=5-100$ мэ и $f=0,1$ Мгц), в приложении приведены характеристики этих материалов в различных условиях работы.

Приемо-сдаточные испытания оксидных магнитов (из феррита бария) ведутся по ведомственным техническим условиям [B_r , B_H и $(BH)_{max}$], причем контроль осуществляется непосредственно на изделии и лишь в случае, если конфигурация магнита не дает возможности определить требуемые характеристики, на специально изготовленных контрольных образцах.

Из этого краткого обзора стандартизации в СССР ферромагнитных материалов ясно, что многие ГОСТ необходимо пересмотреть, а некоторые ГОСТ на ряд материалов должны быть заново разработаны.

Наряду с этим за последние годы (1959—1960 гг.) институтами системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов и другими научно-исследовательскими институтами проведена довольно большая работа по составлению методических документов, относящихся к испытанию ферромагнитных материалов.

ВНИИМ разработан проект методических указаний по испытанию образцов низкоуглеродистых электротехнических сталей. Свердловским филиалом ВНИИМ разработан проект инструкции по испытанию нормальных образцов электротехнической стали.

Свердловский филиал продолжает методическую работу по испытанию образцов в слабых магнитных полях.

Вопросами испытаний по ГОСТ 802—58 занимались и продолжают заниматься такие организации как ВИЗ, УФАН СССР, ЦНИИЧМ, завод «Электросталь» и др.

Накоплен большой и ценный материал и требуется теперь обработка его для внесения изменений в ГОСТ 802—58.

ВНИИМ разработан проект методических указаний по испытанию ленты холоднокатаной рулонной из электротехнической стали, применительно к проекту соответствующего ГОСТ.

Проведена работа по испытанию магнитномягких железоникелевых и железокобальтовых сплавов (ИПС ЦНИИЧМ). Необходимо рассмотреть эти материалы и внести дополнительную методическую часть в проект соответствующего ГОСТ.

ВНИИМ разработан методический раздел проекта стандарта, составленного Ленинградским сталепрокатным заводом на слабомагнитную бандажную проволоку.

Вопросам стандартизации уделяется достаточно большое внимание в зарубежных странах. В таблице приведены сводные данные по характеристикам и методике их определения для различных групп материалов, составленные на основании некоторых нормативных документов этих стран.

Методические вопросы, включая и рассмотрение аппаратуры, наиболее подробно разработаны в США и нашли отражение в соответствующих отдельных стандартах (ASTM). Имеется также весьма детально разработанный Чехословацкий нормативный документ на испытание магнитномягких материалов и подобные же Венгерские документы (1960 г.).

В большинстве же иностранных стандартов на ферромагнитные материалы методика и аппаратура составляют содержание отдельного раздела. В немецких стандартах, наряду с рекомендациями конкретной методики и аппаратуры, имеются указания о возможности применения любой аппаратуры, которая позволяет определять указанные в стандарте магнитные характеристики.

В 1958 г. Международной электротехнической комиссией было внесено предложение об использовании нормативных материалов ASTM на магнитные измерения с соответствующими их изменениями в качестве международных рекомендаций. Однако нам не известно, в каком положении этот вопрос находится в настоящее время.

Что касается производственной базы по изготовлению аппаратуры для испытания магнитных материалов, то, по-прежнему, как это уже отмечалось на предыдущем совещании по магнитным измерениям в 1958 г., единственным заводом (если не считать завод «Вибратор», выпускающий миллиамперметры и баллистические гальванометры) является киевский завод «Точэлектроприбор». За последние годы им разработаны установки У578 для испытания электротехнических сталей в соответствии с ГОСТ 802—58 и У5011 для измерения потерь в образцах электротехнических сталей ваттметровым методом в диапазоне частот 25—1000 гц. Кроме этих установок, завод продолжает выпускать установки БУ3 и У541 для испытаний магнитных материалов на постоянном токе баллистическим методом, установки У55 и У542 для испытаний образцов на переменном токе частотой 50 гц и установку У520, являющуюся мостом переменного тока и предназначенную для измерения индуктивности и сопротивления катушек с кольцевыми сердечниками при частотах 500, 1000, 2400 и 4800 гц. По поводу перечисленных выше установок у потребителей их имеется ряд замечаний и пожеланий. Наиболее общим является требование к заводу предоставить возможность приобрести не только комплекты установок, а также и их отдельные элементы.

Об этом было уже записано в решениях совещания 1958 г. Кроме того, следует критически пересмотреть все выпускаемые заводом установки в свете современных требований, учесть поступившие замечания и пожелания и внести соответствующие изменения в конструкцию и комплектацию установок. Такого рода пересмотр желательно повторять периодически. Завод «Точэлектроприбор» уже начал проведение этой

Страна и нормативный документ	Характеристика	Методика и аппаратура
Магнитножесткие материалы		
ФРГ DIN 17410 1960 г.	$(BH)_{\max}$; B_r ; H_c ; B_a и H_a для $(BH)_{\max}$; μ_r	Отсутствуют указания
США QQ M-60 1950 г.	H_c ; B_r	Перечень методов и аппаратуры в зависимости от сорта материала со ссылкой на соответствующую литературу. Пермеаметры, замкнутая магнитная цепь
Слабомагнитные материалы		
США ASTM A342-53 1953 г.	Нормальная магнитная проницаемость μ (для $\mu = 1 - 4$)	Баллистический метод в разомкнутой магнитной цепи — непосредственной оценки и нулевой Погрешность 2%
	То же (для $\mu < 1,05$)	Магнитомеханическое устройство (электромагнит с весами) Погрешность $\pm 8\%$
Магнитномягкие материалы		
а) низкоуглеродистая сталь — армко		
ФРГ DIN 19405 1960 г.	H_c ; $B_{0,2} \div B_{10}$; B_r	Баллистический метод в замкнутой или разомкнутой цепи. В разомкнутой цепи также магнитометр. Ссылка на литературу
б) листовая электротехническая сталь		
ФРГ TGL 27567 : 1 DIN 46400 1954 г.	P 10/50; P 15/50; B для H от 5 до 300 а, см	Прибор Эпштейна (абсолютный и дифференциальный) — измерение потерь Прибор Эпштейна на постоянном токе с измерением H; дифференциальный на постоянном токе; на переменном токе в других приборах с измерением H_{\max}
США ASTM 345—55 1955 г. A 343—54 1954 г.	P 10/60; P 15/60; P 18/60	Прибор Эпштейна абсолютный и дифференциальный. Подробное описание аппаратуры и методики
Англия BS 601—1935 BS 933—1941	P 10/50; P 13/50	Прибор Лойда — Фипера, Черчера, Эпштейна
Италия UNI 3794 1956 г.	P 10/50; P 15/50; B5 — B300	Отсутствуют указания

Страна и нормативный документ	Характеристика	Методика и аппаратура
Румыния STAS 673—57 1957 г.	P 10/50; P 15/50; B25 → B300	Прибор Эпштейна — измерение потерь. Прибор Эпштейна с измерением поля на постоянном токе; дифференциальный — на постоянном токе — измерение индукции
Франция NF C 28—900, 1956 г.	P 10/50; P 15/50; B5 → B300	Прибор Эпштейна — измерение потерь. Пермеаметр Илиовичи, замкнутая магнитная цепь; полосовые образцы — измерение индукции
Индия IS: 648—1955 1955 г.	P 10/50; P 13/50; H для B от 10 до 16 кгс	Ссылка на стандарт IS: 649—1955 на методику и аппаратуру
в) железоникелевые сплавы		
ФРГ DIN 41301 1954 г.	Нормальная магнитная проницаемость μ при $H = 20$ мэ, 50 гц, основная волна; δ_2 ; δ_{100} ; 50 гц Температурный коэффициент μ (для устройства связи)	Аппаратура любая, позволяющая определять вышеуказанные характеристики
ФРГ DIN 17405 1960 г.	B0,2 → B40; H_c и ее изменение после старения (нагрева-ния)	Баллистический метод в замкнутой или разомкнутой цепи. В разомкнутой цепи также магнитометр. Ссылка на литературу
Магнитодиэлектрики и ферриты		
ФРГ TGL 6549 1958 г.	μ_a ; коэффициенты потерь при частотах 25 кгц — 100 Мгц; температурный коэффициент проницаемости	Любой метод, позволяющий измерять вышеуказанные характеристики
ФРГ DIN 41281 1954 г.	μ (образца); Q; температурный коэффициент проницаемости 1 кгц — 100 Мгц	Любой метод, позволяющий измерять вышеуказанные характеристики
ФРГ TGL 4194 1957 г.	Магнитномягкие μ_a $f = 1$ кгц; $\lg \delta$ ($f = 100$ кгц) H_c ; B 10 (при 25 и 75° С); точка Кюри T_C Магнитножесткие B_r ; $B H_c$; H_c ; $(BH)_{max}$ точка Кюри T_C	Магнитномягкие Индукция — баллистическим гальванометром или феррометром H_c — коэрцитиметром μ_a и $\lg \delta$ — любым методом, позволяющим определять эти характеристики Магнитножесткие Пермеаметр типа Неймана
Польша 1959 г.	Магнитномягкие μ_a (при $H = 5$ мэ и 50 кгц) B при $H = 40$ э и при температуре 20 и 60° С. H_c ; T_C ; температурный коэффициент μ_a при $H = 5$ мэ, $\frac{\lg \delta}{\mu}$ при $B = 1$ гс и $\frac{\mu}{10}$ кгц — 10 Мгц. μ_{max} при 1 кгц Магнитножесткие B_r ; $B H_c$; $(BH)_{max}$; температурный коэффициент B_r ; T_C	Отсутствуют указания

работы (в настоящее время им перерабатывается установка У520):

Совершенно очевидно, что количество выпускаемой аппаратуры, а главным образом ее ассортимент не соответствуют требованиям потребителей.

В этом направлении требуется принятие решительных мер и, в первую очередь, по обеспечению аппаратурой для испытаний по стандартам.

Для контроля оксидных и порошковых магнитномягких материалов серийно выпускаются лишь измерители добротности, или куметры, совершенно не удовлетворяющие запросы измерителей. Они не дают возможности определять зависимость основных параметров этих материалов (проницаемость и тангенс угла потерь) от напряженности магнитного поля, а погрешности их доходят (по величине добротности) до 10%.

Некоторые научно-исследовательские институты и промышленные предприятия имеют импортные установки или установки, собранные почти полностью из импортных элементов. Отсутствие необходимой технической документации на эту аппаратуру или ее неполнота не дают возможности производить анализ погрешностей измерений. Поэтому остается единственный путь комплектной поверки, что не всегда дает удовлетворительные результаты.

В последние годы НГИМИП разработан комплект катушек индуктивности и добротности для поверки отечественных куметров. Им же разработан набор высокочастотных пермеаметров, которые могут быть применены в сочетании с куметром или соответствующим мостом для контроля порошковых материалов в виде кольцевых образцов стандартных размеров.

В настоящее время ВНИИМ и НГИМИП поручается возглавить работу по стандартизации методов и аппаратуры для испытания всех ферромагнитных материалов в очень широком диапазоне частот (от 0 до 100 МГц) и различных режимах намагничивания.

Естественно, что такой большой объем весьма ответственной работы может быть выполнен лишь при активном участии ряда научно-исследовательских институтов и промышленных предприятий.

Подводя итоги изложенному выше, можно сформулировать следующие выводы и предложения:

1. Необходимо для различных видов магнитных материалов (магнитномягкие, магнитножесткие и др.), а в некоторых случаях и применительно к конкретным изделиям из магнитных материалов, установить минимальное, но достаточное число магнитных характеристик, которые следует рекомендовать для включения в соответствующие стандарты в качестве обязательно контролируемых при приемо-сдаточных испытаниях.

2. Следует обратить внимание заводов-изготовителей магнитных материалов и соответствующих научно-исследовательских учреждений, а также министерств и ведомств, в ведении которых находятся эти организации, на необходимость выпуска подробных каталогов, разносторонне характеризующих свойства выпускаемых в СССР магнитных материалов. В этих каталогах должны быть даны как среднестатистические характеристики, так и возможные отклонения от них.

3. Необходимо во вновь разрабатываемых и пересматриваемых стандартах иметь достаточно развитый раздел, касающийся методики и аппаратуры для магнитных испытаний с указанием допустимых погрешностей измерений. В стандартах должно быть также указание, что

для проведения испытаний допускается только аппаратура, апробированная органами Комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

4. Необходимо в кратчайший срок доработать или разработать заново ГОСТ на низкоуглеродистые электротехнические стали (армко), на магнитномягкие железоникелевые и железокобальтовые сплавы, на ленту холоднокатаную рулонную из электротехнической стали, на магнитодиэлектрики и ферриты, пересмотреть ГОСТ на листовую электротехническую сталь (802—58), учитывая высказанные выше положения о магнитных характеристиках, подлежащих контролю, и методике и аппаратуре для определения этих характеристик, а также пересмотреть ГОСТ на термины и определения в области магнитных измерений.

5. Необходимо в кратчайший срок разработать перечень магнитоизмерительной аппаратуры для промышленного изготовления, в первую очередь, применительно к требованиям ГОСТ на ферромагнитные материалы, а также для исследований в заводских и научных лабораториях, обеспечив промышленное изготовление этой аппаратуры. Вместе с тем должны быть расширены масштабы производства уже освоенной заводами аппаратуры, отвечающей современным требованиям практики.

6. Следует рекомендовать дальнейшее развитие работ ВНИИМ и других институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов по составлению инструкций для испытаний ферромагнитных материалов.

ВОПРОСЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ, СВЯЗАННЫЕ С КОНТРОЛЕМ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье рассматриваются основные задачи, стоящие перед измерительной техникой в связи с изучением и стандартизацией свойств различных видов ферромагнитных материалов.

В настоящее время магнитные материалы находят все более широкое применение в различных областях техники, таких, как электромашиностроение и аппаратостроение, радиосвязь, телевидение, электронная автоматика, телемеханика и т. д.

В связи с этим значительно увеличилось число применяемых марок материалов, расширен их сортамент главным образом в сторону уменьшения толщины лент и диаметра проволоки до десятков и единиц микрон. Расширена номенклатура и повышен уровень магнитных параметров магнитных материалов, более разнообразными становятся условия эксплуатации деталей из них.

Все это ставит перед исследователями и изготовителями магнитных материалов ряд вопросов, связанных с определением магнитных свойств. Здесь и далее речь идет только о металлических материалах, разрабатываемых и изготавливаемых предприятиями черной металлургии обычными металлургическими приемами — путем выплавки слитка, обработки давлением и термической обработки. Заводы-изготовители поставляют металл, детали из которого изготавливают заводы-потребители. Ряд вопросов измерительной техники является общим для всех магнитных материалов.

Основными вопросами, связанными с определением магнитных свойств материала, являются:

- 1) выбор параметров, характеризующих материал в различных условиях его службы;
- 2) выбор образцов для определения свойств материала; при этом форма и вес образцов обычно существенно отличаются от формы и веса деталей из этих материалов;
- 3) выбор метода измерения параметров, схемы и аппаратуры, обеспечивающих необходимую точность измерения; разработка методики измерения, применительно к измеряемым материалам;
- 4) стандартизация условий испытания;
- 5) автоматизация процессов измерения.

Основными задачами, которые ставит перед собой при определении свойств магнитных материалов промышленность, изготовляющая только металл, являются:

1) осуществление контроля магнитных свойств металла, обеспечивающего проверку качества технологического процесса производства металла, в том числе правильность химического состава, обеспечение нужной структуры, правильность термической обработки, позволяющей получать в изделии заданные свойства;

2) определение свойств металлов при различных режимах их работы в широком диапазоне полей, частот, температур с целью получения зависимости магнитных свойств от указанных выше (а также других, не указанных здесь) факторов.

Эти данные необходимы как для изучения влияния различных технологических процессов изготовления сплавов на их свойства, так и как справочный материал для потребителей сплавов, позволяющий им сделать правильный выбор марки сплава в зависимости от условий его эксплуатации.

Для выполнения указанных задач необходима специальная аппаратура и установленная методика определения свойств магнитных материалов.

Ниже проанализировано положение с разрешением поставленных вопросов для магнитномягких, магнитотвердых и слабомагнитных материалов, выпускаемых заводами черной металлургии, и сделана попытка сформулировать задачи по разработке методов контроля свойств магнитных материалов.

Магнитномягкие материалы

Магнитномягкие материалы, изготовляемые металлургической промышленностью, могут быть подразделены на следующие основные группы:

1) низкоуглеродистая электротехническая сталь, поставляемая в листе по ГОСТ 3836—47, в прутке по ЧМТУ 2900—56;

2) электротехническая кремнистая сталь, поставляемая по ГОСТ 802—58 и применяемая в магнитных цепях электрических машин, аппаратов и приборов, при намагничивании главным образом в переменных полях частотой 50 и 400 гц;

3) сплавы с высокой магнитной проницаемостью, с прямоугольной петлей гистерезиса, с высокой индукцией насыщения, магнитострикционные сплавы, применяемые в статическом и динамическом режимах, в том числе и при импульсном режиме намагничивания.

Низкоуглеродистая электротехническая сталь (ГОСТ 3836—47 и ЧМТУ 2900—56) нормируется по параметрам: а) коэрцитивная сила; б) магнитная индукция на коммутационной кривой намагничивания в заданных полях $B_5 \div B_{500}$; в) максимальная магнитная проницаемость.

Две последние характеристики указаны только для листовой стали и не являются браковочными характеристиками.

Что касается образцов для измерения (ГОСТ 3836—47), то для определения коэрцитивной силы вырезаются образцы шириной 20 мм, длиной 400 мм из средней и крайней частей листа поперек направления прокатки. Для определения магнитной индукции изготавливаются образцы шириной 20 мм, длиной 400 мм, составленные из четного числа полос, половина из которых вырезается вдоль и половина поперек направления прокатки. Суммарное поперечное сечение образца не более

0,5 см². Допускается измерение индукции на тороидах с наружным диаметром 120 мм и внутренним 90 мм.

Образцы перед измерением подвергаются термической обработке. По ЧМТУ 2900—56 для определения коэрцитивной силы применяются термически обработанные образцы диаметром не более 10 мм и длиной 400 мм.

Для определения коэрцитивной силы рекомендуется измерение баллистическим методом в разомкнутой цепи — для листовой стали после намагничивания в поле 200 э, для прутковой — поле не указано. Определение магнитной индукции должно производиться при намагничивании в замкнутой цепи (пермеаметр с паспортом ВНИИМ). Максимальная проницаемость определяется на кольцевых образцах или в пермеаметре по кривой намагничивания графическим методом. Методика измерения не разработана, имеющиеся методические указания недостаточны.

В связи с этим как поставщики стали, так и потребители ее получают в ряде случаев несопоставимые результаты.

Необходимо пересмотреть и уточнить методику испытания низкоуглеродистой электротехнической стали. Составить методическую инструкцию, обязательную при проведении контроля стали.

Электротехническая кремнистая сталь (ГОСТ 802—58) нормируется по: а) магнитной индукции в заданных полях на основной коммутационной кривой В 0,002—В 300; б) полным удельным потерям Р 10/50; Р 15/50; Р 17/50; Р 7,5/400; Р 10/400 при заданной индукции и частотах 50 и 400 гц.

Образцами для измерения служат пакеты, собранные из полос: 30×500 мм (общим весом 10 кг); 30×250 мм (общим весом 1—2 кг).

Пакеты собираются в четырехугольную рамку.

Рекомендуется также испытание целых листов.

Для измерения рекомендуются баллистический и ваттметровый дифференциальный и абсолютный методы при намагничивании пакетов в аппаратах Эпштейна.

Для испытания стали по ГОСТ 802—58 на заводе «Точэлектроприбор» Киевского Совнархоза разработана и изготавливается специальная установка У578, позволяющая проводить все необходимые испытания. Однако в связи с тем, что завод выпускает только единичные образцы этой установки и она дорога и громоздка, а также тем, что для контроля свойств стали не всегда требуется определение всех параметров, указанных в ГОСТ, большее применение находят другие установки для раздельного испытания индукции и потерь.

Для определения индукции в постоянных полях баллистическим методом применяют установки БУ-3 или самодельные установки, собранные из высококачественных приборов, которые обеспечивают необходимую точность измерения.

Для определения удельных потерь собирают ваттметровые установки с ваттметрами Д522 и Д542, вольтметрами МВ4-1А и другими. Эти установки, собранные из приборов, предназначенных для частот 50 и 400 гц, также обеспечивают необходимую точность измерения.

Для намагничивания образцов на самодельных баллистических и ваттметровых установках применяют обычно также самодельные аппараты Эпштейна, конструкция и порядок изготовления которых никем не регламентированы.

Несмотря на широкое применение баллистического и ваттметрового методов измерения, до настоящего времени нет установленной методики измерения свойств электротехнической стали этими методами.

Испытание целых листов проводится на специальных нестандартных установках.

Указанные в ГОСТ 802—58 методы контроля свойств стали по свойствам пакетов, изготовленных из контрольных образцов, не удовлетворяют современным требованиям промышленности [1].

При контроле стали, применяющейся для изготовления крупных магнитопроводов, необходимо проводить испытания на целых листах, так как свойства ее, измеренные на полосках, нарезаемых для образца в аппарат Эпштейна, могут существенно отличаться от свойств целого листа [2].

Кроме того, в связи с неоднородностью магнитных свойств листов одной партии, свойства пробы, составленной из полос от нескольких листов, могут не характеризовать средние свойства партии. При контроле листов холоднокатаной стали в аппаратах Эпштейна в забракованных партиях число годных листов составляет больше половины и среди них значительное количество листов высших сортов [3]. Полистный контроль является прогрессивным не только потому, что приводит к экономии металла, но он обеспечивает лучший контроль свойств, позволяя испытывать большее число листов. Полистный контроль позволяет рассортировывать сталь по группам, внутри которых средние свойства листов будут близки — это представляет интерес также для потребителей, изготавливающих малые магнитопроводы. Полистный контроль допускает автоматизацию процесса измерения, что приведет к повышению качества контроля и производительности труда.

Для контроля свойств по ГОСТ 802—58 необходимо:

1) уточнить и стандартизовать баллистический и ваттметровые методы определения свойств стали; стандартизовать аппараты Эпштейна и условия испытаний при намагничивании в них;

2) разработать единую модель аппарата для полистного контроля стали и после обобщения опыта работы на аппарате заменить метод испытания стали на пакетах методом полистного контроля.

Сплавы с высокой магнитной проницаемостью, с прямоугольной петлей гистерезиса, с высоким магнитным насыщением, магнитоотрицательные сплавы поставляются по различным техническим условиям, в том числе ЧМТУ 1050—55, включающим железоникелевые сплавы с высокой магнитной проницаемостью и сплавы с прямоугольной петлей гистерезиса.

Контроль магнитных свойств этой группы материалов проводится обычно при намагничивании в статическом режиме и только для тонколистовой электротехнической рулонной стали определяют удельные потери при частотах 400 гц.

При испытании в статическом режиме нормируются параметры:

B_s — магнитная индукция насыщения (техническое насыщение);

B — магнитная индукция на основной коммутационной кривой намагничивания в заданном поле;

$\frac{B_r}{B_{max}}$ — отношение остаточного намагничивания к намагничиванию максимальному для цикла — прямоугольность петли гистерезиса;

H_c — коэрцитивная сила;

μ_a — начальная проницаемость;

μ_H — проницаемость в заданном поле H ;

μ_{max} — максимальная проницаемость (μ_a и μ_{max} определяются графически);

λ_s — магнитоотрицательная насыщения.

В качестве образцов для измерения рекомендуются кольцевые образцы различных размеров и веса, а также стержни и пластины для определения индукции насыщения в разомкнутой цепи и в пермеатре. Для определения магнитострикции применяются пластины толщиной 0,1—0,2 мм, шириной 10 мм, длиной 100 мм.

Основным методом контроля магнитных свойств магнитномягких сплавов является в настоящее время баллистический метод. Намагничивание кольцевых образцов осуществляется полем прямого провода или полем, создаваемым обмоткой, нанесенной на образец. Стержни и пластины намагничиваются в соленоидах или пермеатре. Для определения магнитострикции применяют мостовой метод с тензодатчиками на образце.

Несмотря на то, что баллистический метод измерения в настоящее время является основным методом при контроле свойств магнитномягких материалов, стандартизованной методики измерения этим методом до настоящего времени нет.

Опыт работы показывает, что результаты измерений магнитномягких материалов могут зависеть от ряда таких факторов, как формы и размеров образцов, расположения обмотки на образце, условий намагничивания перед измерением, условий подготовки образцов к измерениям, числа и скорости коммутаций, изменения свойств во времени, изменения свойств от температуры.

Необходимо создать единую методику измерения магнитномягких материалов — документ, в котором, помимо описания баллистического метода измерения коммутационной кривой намагничивания и петли гистерезиса, были бы регламентированы условия испытания материала, способ и точность определения по данным измерений всех указанных выше магнитных параметров, в том числе и таких, как μ_a и μ_{max} , определяемых не непосредственно по данным измерений, а графическим способом.

Баллистический метод измерения является весьма трудоемким. В связи с этим необходимо разрешить вопрос автоматизации процесса измерения свойств в статическом режиме и разработать схему, по-видимому, основанную на применении вместо баллистического гальванометра флюксметра с двухкоординатным самописцем. Это позволит автоматизировать процесс измерения и получать запись результатов непосредственно в форме коммутационных кривых намагничивания и петель гистерезиса.

Широкое использование тонколистовых магнитных материалов для изготовления магнитопроводов, аппаратов и приборов, работающих при повышенных частотах, требует введения новых электрических и магнитных характеристик.

Получаемые при испытании в статическом режиме магнитные характеристики не могут быть использованы при расчете устройств, работающих на технической частоте или в области звуковых и радиочастот. В результате этого возникает настоятельная потребность определения характеристик материалов в динамическом режиме при технических, звуковых и радиочастотах, в сложном режиме импульсного намагничивания и одновременного намагничивания постоянным и переменным полем или двумя полями разной частоты.

Справедливость высказываемых требований о приближении условий испытания стали к условиям, в которых в дальнейшем работает материал, не вызывает сомнений. Однако решение вопроса о выборе определяемых в новых условиях характеристик и о введении их в соот-

ветствующим стандартам или нормы требует дальнейшего обсуждения, так как имеющийся в настоящее время фактический материал не позволяет этого сделать. Результаты измерения материалов при повышенных частотах или в сложном режиме намагничивания зависят не только от свойств испытываемой стали, но и в не меньшей степени от формы испытуемого образца, свойств межвитковой изоляции, качества изготовления сердечника и других факторов.

Трудность определения свойств в динамическом режиме усугубляется отсутствием необходимой аппаратуры.

Контроль свойств в динамическом режиме у изготовителя металла практически не производится, за исключением измерения полных удельных потерь при частоте 400 гц для электротехнической стали. Измерение магнитных свойств в динамическом режиме производится главным образом для накопления фактических данных и получения типовых кривых.

Для составления типовых кривых в дальнейшем предполагается определять:

1) полные удельные потери при частотах 25—10 000 гц при синусоидальной индукции до 90% от насыщения;

2) амплитудную магнитную проницаемость, определяемую как отношение максимального значения индукции B_{\max} к максимальному значению намагничивающего поля H_{\max} (при синусоидальном изменении индукции), в том же интервале частот и индукции;

3) магнитную проницаемость и удельные потери в диапазоне частот 10 000—300 000 гц;

4) петлю гистерезиса при частотах от 25 до 20 000 гц.

Указанные характеристики могут быть определены при различных температурах.

Что касается образцов для измерений, то в настоящее время определение магнитных свойств проводится на кольцевых образцах различной формы и размеров. В динамическом режиме испытание проводится обычно на ленточных образцах из лент толщиной от 0,15 до 0,002 мм. Свойства ленточных образцов весьма существенно зависят от свойств межвитковой изоляции. При нанесении изоляции возможно ухудшение свойств поверхностных слоев металла за счет его взаимодействия с материалом изоляционного слоя. При существующей технологии изготовления образцов не всегда может быть обеспечено получение качественной межвитковой изоляции. В связи с отсутствием метода контроля качества межвитковой изоляции не всегда возможно разделить влияние свойств металла и межвитковой изоляции на измеряемые свойства образца.

Стандартных методов испытания материалов и аппаратуры для измерения указанных выше магнитных характеристик нет. Определение динамических характеристик проводится главным образом на самодельных установках, собранных часто также из самодельных узлов.

Установки У520 и УМИПТ-1 имеют ограниченное применение и не могут обеспечить измерение всех необходимых магнитных характеристик.

Установка ДСПУ-М является весьма перспективной, позволяет получать объективную запись динамической петли при частотах от 50 гц до 20 кгц, однако до настоящего времени имеется лишь один экземпляр установки. Наряду с ней должна быть установка для непосредственного измерения проницаемости и потерь.

Для испытания в динамическом режиме при синусоидальном изменении индукции необходимо:

1) выбрать параметры, характеризующие свойства металла при намагничивании в динамическом режиме;

2) определить условия, в которых должны проводиться испытания — выбрать диапазон частот, определить форму и размеры образцов, условия подготовки образцов к измерению;

3) разработать схему и методику измерения, оговорив возможность применения имеющихся высокочастотных измерительных установок, отдельных изготавливаемых промышленностью узлов, или условий, которым должны удовлетворять узлы измерительных установок;

4) создать генераторы и усилители мощности для питания измерительных схем;

5) создать методические указания по определению магнитных характеристик магнитномягких материалов в динамическом режиме.

Разработка магнитных материалов в виде тончайших лент и пленок, а также ферритов для работы в импульсном режиме, поставила вопрос о создании методов испытания магнитных свойств материалов в импульсном режиме. В настоящее время изыскатели сплавов для работы в импульсном режиме практически не определяют свойств этих сплавов.

Испытания в импульсном режиме проводятся у потребителей на готовых сердечниках различной формы и размеров. Импульсные характеристики сердечников еще в большей степени зависят от технологии изготовления образцов, чем характеристики, определяемые в периодически изменяющихся полях.

Сам импульсный режим намагничивания, в котором работают сердечники у потребителей сплавов, может быть весьма различен по частоте и направлению поля, по форме импульса, по скважности и т. д.

Для изучения магнитных свойств материалов, работающих в импульсном режиме намагничивания, получения сравнимых результатов измерения, исследования влияния химического состава и технологии изготовления материала на его импульсные характеристики, по-видимому, необходимо выбрать определенные импульсный режим намагничивания, форму и размер образцов.

Для получения импульсных характеристик необходимо создать специальную аппаратуру и методику измерения.

Магнитнотвердые сплавы

При испытании в статическом режиме намагничивания и намагничивании в замкнутой и разомкнутой цепи определяют: коэрцитивную силу, остаточное намагничивание, магнитную энергию, поле максимальной проницаемости.

При испытании в динамическом режиме исследуют динамическую петлю, по которой определяются коэрцитивная сила, остаточное намагничивание, коэффициент выпуклости — отношение площади динамической петли к площади прямоугольника $B_p \times H_c$.

Контроль свойств ведется на готовых изделиях, имеющих весьма различную форму и размеры. Для разработки и исследования сплавов изготавливают образцы в виде цилиндров и призм с заданным отношением сечения к длине образца.

Материалы для звуконосителей испытываются на проволоках диаметром от 0,02 до 1 мм и лентах толщиной от 0,05 до 0,20 мм.

Испытание материала в динамическом режиме проводится на образцах, собранных из отштампованных колец.

Для контроля свойств магнитотвердых материалов в статическом режиме широкое применение нашел баллистический метод.

Стандартная установка БУ-3 (а также самодельные баллистические установки) с различными устройствами для намагничивания в разомкнутых и замкнутых цепях, в том числе пермеаметрами и соленоидами разных типов, установлены на предприятиях как производящей, так и потребляющей промышленности.

Методики измерения баллистическим методом магнитотвердых материалов, так же как и магнитномягких, нет.

Для контроля свойств магнитотвердых материалов необходимо:

1) Разработать единый метод определения свойств магнитотвердых материалов баллистическим методом. Установить рациональную форму и размеры образцов простейшей формы (призмы, цилиндры) для испытаний в замкнутой и разомкнутой цепях. Составить основные методические указания для испытания образцов сложной формы. Установить условия измерения — порядок подготовки образцов к испытаниям, требования к однородности намагничивающего поля и др.

2) Создать специальные намагничивающие и размагничивающие устройства — пермеаметры, соленоиды и т. д., позволяющие проводить как намагничивание и размагничивание, так и измерение основных параметров материалов с коэрцитивной силой от 2000 до 7000 э.

3) Разработать аппаратуру, позволяющую осуществлять непрерывный контроль свойств металлических звуконосителей (лент толщиной 0,05—0,02 мм и проволоки диаметром 0,02—1 мм) при перематке их с бобины на кассету со скоростью 5—200 м/мин. Контролировать в процессе перематки можно форму петли гистерезиса, аналогично тому, как сейчас контролируют форму петли на кусках ленты и проволоки осциллографическим методом при намагничивании полем частотой 50 гц. При отклонении формы кривой от заданной должна происходить остановка перематочного устройства.

4) Рекомендовать для испытания материалов гистерезисных двигателей — листовых материалов и проволок с квадратной формой сечения, в динамическом режиме установку ДСШУ-М (или аналогичную ей). Эта установка вполне обеспечивает определение всех необходимых для данного материала параметров при частотах до 20 кгц.

Слабomagнитные материалы

При испытании этих материалов определяют магнитную проницаемость при намагничивании в статическом режиме (величина магнитной проницаемости не более 2,0 гс/э).

В качестве образцов применяют стержни с круглым или прямоугольным сечением.

Общепринятых методов контроля и аппаратуры нет. Испытания проводят не стандартными методами, что в ряде случаев влечет за собой несопоставимость получаемых результатов.

В связи с тем, что в слабomagнитных материалах обычно присутствуют ферромагнитные фазы или ферромагнитные включения, магнитная проницаемость слабomagнитных материалов изменяется в зависимости от величины намагничивающего поля.

Для контроля свойств слабomagнитных материалов необходимо составить методические указания, определив в них стандартные размеры образцов, метод и условия измерения.

Для исследования температурной зависимости указанных выше магнитных свойств как магнитномягких, так и магнитотвердых спла-

вов, а также определения температуры Кюри T_C , необходимо проводить измерение магнитных свойств при различной температуре от -80°C до $600\div 800^\circ\text{C}$.

Необходима разработка специальных термостатов и криостатов, обеспечивающих постоянство температуры в процессе измерения. Для этой же цели необходим выпуск двухкоординатных самописцев, позволяющих записывать изменение одного из измеряемых параметров в функции температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дискуссия по методам определения магнитных свойств электротехнической стали, «Заводская лаборатория», № 4 и 12, 1959.
2. Янус Р. И., ЖТФ, т. 8, 1938; ФММ, № 1, 1955.
3. Вдовин Ю. А., Ярошенко Ю. Н., «Вестник электропромышленности», № 1, 1961.

И. М. РОЖАНОВСКИЙ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ И УНИФИКАЦИИ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

В статье рассматриваются преимущества стандартизации динамических магнитных характеристик, определенных по первым гармоникам магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

Состояние магнитных измерений и исследований в области переменных магнитных полей в настоящий момент определяется наличием значительного числа характеристик, используемых для оценки магнитных свойств материалов в переменных магнитных полях [1]. Не рассматривая их подробно, отметим только, что в качестве характеристик материалов в переменных магнитных полях используются как рекомендованная ГОСТ коммутационная основная кривая намагничивания, снимаемая в постоянных магнитных полях, так и целый ряд разнообразных зависимостей магнитной индукции от напряженности поля, определяемых в переменных магнитных полях.

Выбор тех или иных зависимостей обосновывается степенью их соответствия коммутационной основной кривой намагничивания, определенным используемой измерительной аппаратурой или применяемыми методами расчета. Опыт показывает, что характеристики материалов, определенные при испытании в одних условиях, как правило, не могут быть сопоставимы и воспроизводимы с такими же, полученными в других условиях, и часто не соответствуют тем, которые имеют место в устройствах, в которых материал затем работает.

Разнообразие магнитных характеристик, используемых в переменных магнитных полях, тормозит совершенствование методов магнитных измерений и исследований и разработку магнитоизмерительной аппаратуры, отрицательно сказывается на точности инженерных расчетов различных электромагнитных устройств, к которым предъявляются все возрастающие требования.

Изложенное определяет всю значимость и актуальность вопросов определения и унификации характеристик ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях.

Решение этих вопросов в первую очередь требует установления единой физической основы, которая определяет особенности намагничивания образца испытываемого материала, характерные для переменных магнитных полей. С целью установления такой основы, рассмотрим

кратко электрические, магнитные и энергетические процессы в электрической цепи со сталью в условиях ее подключения к источнику э. д. с. синусоидальной формы, что обычно соответствует реальным условиям проведения магнитных измерений.

Ниже в основу изучения электрических и магнитных процессов положены дифференциальные уравнения электрической цепи со сталью в трех случаях:

1) при наличии в цепи как индуктивного сопротивления $x_{ин}$, обусловленного индуктивностью рассеяния L_u всей цепи, включая источник питания, так и активного сопротивления r_u всей цепи ($x_{ин} \neq 0$ и $r_u \neq 0$);

2) при граничных условиях, когда в цепи имеется только активное сопротивление ($r_u \neq 0$; $x_{ин} = 0$);

3) при граничных условиях, когда в цепи имеется только реактивное сопротивление ($x_{ин} \neq 0$; $r_u = 0$).

В первом случае, при $x_{ин} \neq 0$ и $r_u \neq 0$, дифференциальное уравнение цепи имеет вид

$$e = ir_u + L_u \frac{di}{dt} + \omega_u S \frac{dB}{dt},$$

где i , B , e — мгновенные значения, соответственно, тока намагничивающей цепи, магнитной индукции и э. д. с. источника питания;

S — площадь сечения сердечника;

ω_u — число витков намагничивающей обмотки.

Подставляя в дифференциальное уравнение цепи

$$e = \sqrt{2} E \sin \omega t; \quad i = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{n=\infty} I_n \sin(n\omega t - \psi_n);$$

$$B = \sqrt{2} \sum_{n=1}^{n=\infty} B_n \sin(n\omega t - \theta_n),$$

после проведения необходимых преобразований найдем, что для всех гармоник выше первой

$$\begin{aligned} I_n r_u \sin(n\omega t - \psi_n) + n\omega L_u I_n \sin\left(n\omega t - \psi_n + \frac{\pi}{2}\right) = \\ = n\omega S \omega_u B_n \sin\left(n\omega t - \theta_n - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

очевидно,

$$n\omega S \omega_u B_n = E_n. \quad (2)$$

Сложение синусоидальных величин левой части (1) дает

$$U_n = \sqrt{(I_n r_u)^2 + (n\omega L_u I_n)^2 + 2(I_n r_u)(n\omega L_u)}$$

и

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \frac{I_n (r_u \sin \psi_n + n\omega L_u \cos \psi_n)}{I_n (r_u \cos \psi_n + n\omega L_u \sin \psi_n)}. \quad (3)$$

Тогда (1) приводится к виду:

$$U_n \sin(n\omega t - \gamma_n) = E_n \sin\left(n\omega t - \theta_n - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что для гармоник выше первой

$$U_n = E_n \text{ и } \gamma_n = \theta_n + \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

Рассмотрение формул (2) и (5) приводит к заключению, что в электрической цепи со сталью ферромагнитный сердечник является генератором э. д. с. высших гармоник, наводимых в намагничивающей обмотке магнитными потоками высших гармоник. Таким образом, для токов высших гармоник сопротивление источника питания и всей намагничивающей цепи является внешней нагрузкой. Активное сопротивление r_n и реактивное сопротивление x_{nn} этой нагрузки определяют угол сдвига фаз φ_n между э. д. с. и токами высших гармоник. Действительно, из формулы (3) находим:

$$\frac{I_n n \omega L_n}{I_n r_n} = \frac{x_{nn}}{r_n} = \frac{\sin(\psi_n - \gamma_n)}{\cos(\psi_n - \gamma_n)} = \operatorname{tg}(\psi_n - \gamma_n) = \operatorname{tg} \varphi_n; \quad (6)$$

$$\varphi_n = \psi_n - \gamma_n.$$

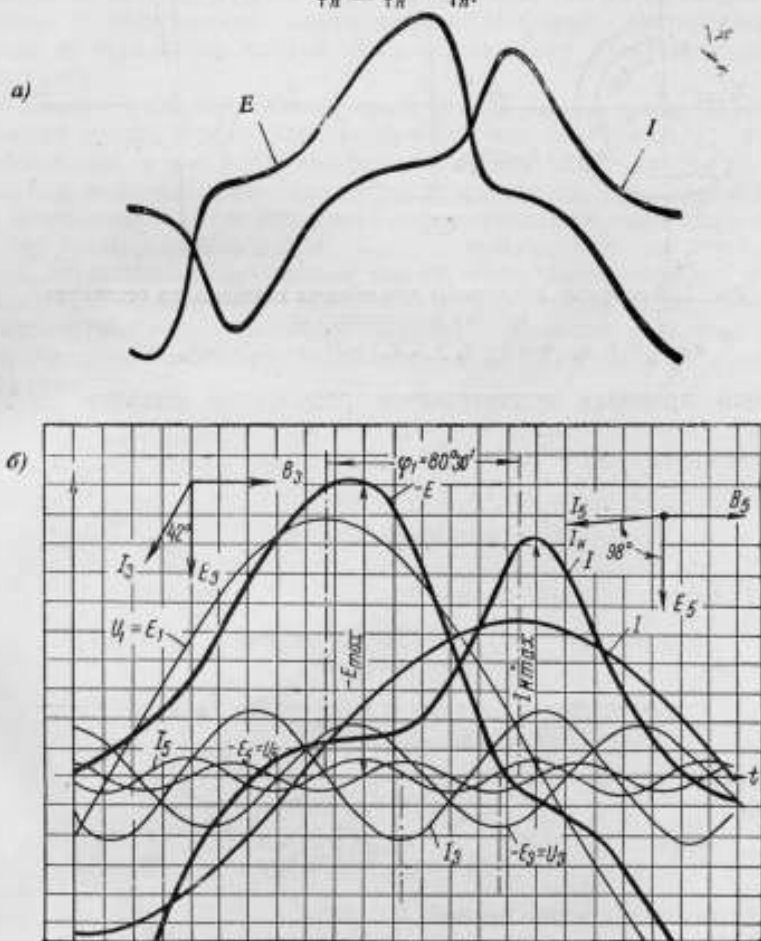


Рис. 1. а) Осциллограмма и б) кривые разложения $E(t)$ и $I(t)$.

Угол магнитного запаздывания α_n определяется как разность начальных фаз токов I_n и магнитной индукции B_n . Тогда, принимая во внимание (5) и (4),

$$\alpha_n = \psi_n - \theta_n = \frac{\pi}{2} + \varphi_n. \quad (7)$$

Следовательно, при $x_{nu} \neq 0$ и $r_u \neq 0$ угол сдвига фаз между потоками и токами высших гармоник всегда больше $\frac{\pi}{2}$.

При этом значении угла α_n активные и реактивные составляющие токов высших гармоник равны:

$$I_{n \text{ акт}} = I_n \cos \varphi_n; \quad I_{n \text{ реакт}} = I_n \sin \varphi_n. \quad (8)$$

На рис. 1 приведены осциллограмма а) кривых $E(t)$ и $I(t)$ и векторные диаграммы б) для высших гармоник, построенные по данным разложения этих кривых. Как видно из диаграмм (рис. 1, б и 2, а), экспери-

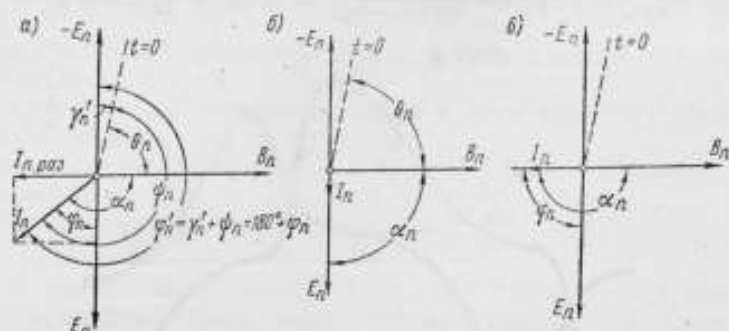


Рис. 2. Векторные диаграммы для высших гармоник на основании кривых разложения при:

$$a - r_u \neq 0, x_{nu} \neq 0; \quad б - r_u \neq 0, x_{nu} = 0; \quad в - r_u = 0, x_{nu} \neq 0.$$

ментальная проверка подтверждает результаты анализа дифференциального уравнения цепи при $x_{nu} \neq 0$; $r_u \neq 0$.

Для второго случая

$$r_u \neq 0; \quad x_{nu} = 0; \\ e = ir_u + S \omega_n \frac{dB}{dt}$$

и для всех гармоник выше первой

$$I_n r_u \sin(n\omega t - \varphi_n) = n\omega S \omega_n B_n \sin\left(n\omega t - \theta_n - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$I_n r_u = E_n; \quad \psi_n = \theta_n + \frac{\pi}{2}; \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2}; \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2}. \quad (9)$$

В третьем случае при

$$x_{nu} \neq 0; \quad r_u = 0; \\ e = L_u \frac{di}{dt} + S \omega_n \frac{dB}{dt}$$

и для всех гармоник выше первой

$$I_n x_{nu} \sin\left(n\omega t - \psi_n + \frac{\pi}{2}\right) = n S \omega_n B_n \sin\left(n\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$I_n x_{nu} = E_n; \quad \psi_n = \theta_n + \pi; \quad \varphi_n = \pi; \quad \varphi_n = \frac{\pi}{2}. \quad (10)$$

При $r_u \neq 0$; $x_{nu} = 0$ токи высших гармоник, как следует из выражения (9), совпадая по фазе с э. д. с. E_n (рис. 2, б), не оказывают размагничивающего действия на магнитные потоки высших гармоник. По этой причине форма кривой магнитной индукции в рассматриваемых усло-

внях остается искаженной. Наряду с этим при достаточно большом значении r_n токи высших гармоник подавляются и из искаженной кривой $I(t)$ выделяется первая гармоника тока.

В реальных электрических цепях со сталью условия, соответствующие рассмотренным, имеют место при $r_n \gg x_{mn}$. Следовательно, возникновение при $r_n \gg x_{mn}$ искаженной кривой магнитного потока и практически синусоидальной формы тока $I(t)$ находит свое объяснение в явлениях, описанных выше.

При $x_{mn} \neq 0$ и $r_n = 0$ токи высших гармоник, как следует из формулы (10), находятся в противофазе с потоками высших гармоник B_n (рис. 2, б). При относительно малом значении x_{mn} величина токов будет достаточной для подавления высших гармоник магнитной индукции и выделения из кривой $B(t)$ ее первой гармоники. Этим объясняется приближение к практически синусоидальной форме кривой магнитной индукции и искажение кривой тока в реальных электрических цепях, если $x_{mn} \gg r_n$.

Обобщая сказанное выше, приходим к следующему заключению: в условиях подключения электрической цепи со сталью к источнику синусоидальной э. д. с. токи высших гармоник, как и вихревые, по природе своего возникновения являются вторичными, а по характеру действия, в отличие от сложившихся представлений, не намагничивающими, а размагничивающими. Следовательно, намагничивание материала в переменных магнитных полях, т. е. возникновение гармоник индукции всех порядков, обусловлено только током первой гармоники.

Рассмотрим энергетические процессы, положив в основу формулу для определения мощности, потребляемой за один цикл перемагничивания образца

$$P = \nu f \int_0^{2\pi} H \frac{dB}{d(\omega t)} d(\omega t), \quad (11)$$

где $\nu = Sl$; $H = \frac{i\omega_n}{l}$ и $\frac{dB}{dt} = \sum_{n=1}^{n=\infty} \sqrt{2} n \omega B_n \sin(n\omega t - \theta_n + \frac{\pi}{2})$.

Некоторые преобразования приводят формулу (11) к виду

$$P = S\omega_n \left\{ \int_0^{2\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{n\omega B_n I_n}{2} \sin(\psi_n - \theta_n) d(\omega t) - \int_0^{2\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{n\omega B_n I_n}{2} \cos \left[2n\omega t - \left(\psi_n + \theta_n - \frac{\pi}{2} \right) \right] d(\omega t) + \int_0^{2\pi} \sum_{\substack{n=1 \\ k=n+1}}^{n=\infty} 2n\omega B_n I_k \sin \left(n\omega t - \theta_n + \frac{\pi}{2} \right) \sin(k\omega t - \psi_k) d(\omega t) \right\}. \quad (12)$$

В результате интегрирования первого интеграла определяются потери в стали

$$P_{cr} = S\omega_n \sum_{n=1}^{n=\infty} n\omega B_n I_n \sin(\psi_n - \theta_n) = S\omega_n \sum_{n=1}^{n=\infty} n\omega B_n I_n \sin \alpha_n. \quad (13)$$

Разделяя в выражении (13) первые и высшие гармоники, учитывая равенства (5) — (7) и векторную диаграмму для высших гармоник, найдем

$$P_{\text{ст}} = E_1 I_1 \cos \varphi_1 - \sum_{n=2}^{\infty} E_n I_n \cos \varphi_n \quad (14)$$

или

$$P_{1 \text{ вкт}} = E_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_{\text{ст}} + \sum_{n=2}^{\infty} E_n I_n \cos \varphi_n. \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что вся активная мощность, потребляемая в электрической цепи со сталью, является активной мощностью первой гармоники, доставляемой в цепь источником питания с синусоидальной формой э. д. с.

Второй интеграл выражения (12) в технической литературе не рассматривается, так как результат его интегрирования в пределах одного периода равен нулю. Вместе с тем, такой результат свидетельствует о том, что этот интеграл связан с обратной или реактивной энергией, т. е. с процессами намагничивания. Поэтому в целях изучения этих процессов целесообразно провести интегрирование в пределах времени $0 \div \frac{T}{4}$ соответствующего полупериоду подынтегральной функции, изменяющейся с двойной частотой.

Учитывая равенства (5) — (7), конечный результат интегрирования в принятых пределах времени можем привести к виду

$$P_{\text{магн}} = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} E_n I_n \cos \alpha_n = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} E_n I_n \sin \varphi'_n, \quad (16)$$

где в соответствии с векторной диаграммой рис. 2 для высших гармоник

$$\varphi'_n = \alpha_n + \frac{\pi}{2} = \pi + \varphi_n. \quad (17)$$

Тогда, для первых и высших гармоник, принимая во внимание формулу (7) или (17),

$$P_{\text{магн}} = \frac{2}{\pi} E_1 I_1 \sin \varphi_1 - \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} E_n I_n \sin \varphi_n \quad (18)$$

или

$$\frac{2}{\pi} E_1 I_1 \sin \varphi_1 = P_{\text{магн}} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} E_n I_n \sin \varphi_n. \quad (19)$$

Наличие дроби $\frac{2}{\pi}$ показывает, что формула (19) является выражением баланса средней реактивной мощности за четверть периода, т. е. для одной полуволны реактивной мощности, изменяющейся с двойной частотой. Отрицательный знак перед членами реактивной мощности высших гармоник в формуле (19) подтверждает ранее сказанное о размагничивающем действии токов высших гармоник.

На основании формулы (19) приходим к следующему заключению: вся мощность, расходуемая при намагничивании образца, является частью реактивной мощности первой гармоники, доставляемой источником питания с синусоидальной формой э. д. с.

Результат интегрирования третьего интеграла, содержащего произведения синусов с аргументами разных периодов, равен, как известно, нулю [2]. Этот результат свидетельствует о том, что третья составляющая не оказывает влияния на процесс намагничивания сердечника.

Рассмотрим энергетические процессы при граничных условиях:

$$r_n \neq 0, x_{нд} = 0 \text{ и } x_{нд} \neq 0; r_n = 0.$$

При $r_n \neq 0$ и $x_{нд} = 0$, в соответствии с равенствами (9), $\alpha_n = \frac{\pi}{2}$; $\varphi_n = 0$; $E_n = I_n r_n$. Тогда из формулы (15) следует, что активная мощность

$$P_{1акт} = E_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_{ст} + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 r_n. \quad (20)$$

Баланс активной мощности при $r_n \neq 0$ и $x_{нд} = 0$ впервые был рассмотрен в [3, 4].

Реактивная мощность определяется из выражения (18), если принять во внимание условие (10):

$$P_{1реакт} = \frac{2}{\pi} E_1 I_1 \sin \varphi_1 = P_{магн}. \quad (21)$$

Следовательно, в рассматриваемых условиях вся реактивная мощность расходуется только на намагничивание сердечника. Это следствие является весьма важным, так как позволяет решить, как показано ниже, дискуссионный вопрос о намагничивающем токе для режима практически синусоидальной формы тока.

При $x_{нд} \neq 0$; $r_n = 0$, учитывая равенства (10), найдем из выражения (15), что активная мощность первой гармоники

$$P_{1акт} = E_1 I_1 \cos \varphi_1 = P_{ст} \quad (22)$$

расходуется только на покрытие потерь в стали.

На тех же основаниях найдем баланс реактивной мощности

$$P_{1реакт} = \frac{2}{\pi} E_1 I_1 \sin \varphi_1 = P_{магн} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=2}^{\infty} E_n I_n. \quad (23)$$

На основании сказанного выше, к рассматриваемым условиям может быть отнесено условие $x_{нд} \gg r_n$, при котором имеет место режим практически синусоидальной формы кривой магнитной индукции и искаженной формы кривой тока. Отсюда следует, что при этом режиме реактивная энергия первой гармоники частично расходуется на намагничивание образца, а частично на размагничивание токами высших гармоник.

Из сравнения формул (21) и (23) следует, что при одном и том же значении B_1 потребление реактивной мощности при практически синусоидальной форме магнитной индукции будет больше, чем при практически синусоидальной форме напряженности поля. Увеличение потребления реактивной мощности находит свое отражение в возрастании реактивной составляющей тока первой гармоники.

Для подтверждения изложенного на рис. 3 приведены экспериментальные кривые зависимостей $P_{1реакт} = f(B_{1max})$ для пермаллоя и для стали Э41, Э44, снятые при синусоидальной индукции и синусоидальной напряженности поля.

Результаты изучения энергетических процессов в разных режимах показывают, что электрические и магнитные явления всех гармоник обусловлены только энергией первой гармоники, поступающей в цепь от источника питания с синусоидальной формой э. д. с. Интенсивность этих явлений определяет потребление активной и реактивной мощности

первой гармонике, величину и фазу первых гармоник магнитной индукции и напряженности поля.

Таковы основные особенности электрических, магнитных и энергетических процессов, определяющих магнитное состояние образца, намагничиваемого в условиях электрической цепи, подключенной к синусоидальной э. д. с.

Физическое содержание характерных особенностей намагничивания образца само по себе определяет выбор наиболее оправданной и целесообразной основы для определения и унификации магнитных характеристик в переменных магнитных полях.

Очевидно, в качестве такой основы должны быть приняты процессы, обусловленные первыми гармониками магнитной индукции B_1 , напряженности поля H_1 и углом магнитного запаздывания α_1 . Следовательно, магнитные характеристики в переменных магнитных полях должны определяться по первым гармоникам B_1 , H_1 ; α_1 .

Преимущества определения магнитных характеристик по первым гармоникам проявляются, прежде всего, в возможности уточнения ряда вопросов магнитных измерений и инженерной практики. К ним относятся дискуссионные вопросы определения намагничивающего тока и комплексной магнитной проницаемости в рассматриваемых условиях действия в цепи синусоидальной э. д. с., понятия о динамической гистерезисной петле и векторной диаграмме и другие.

В основу решения вопроса об определении намагничивающего тока следует

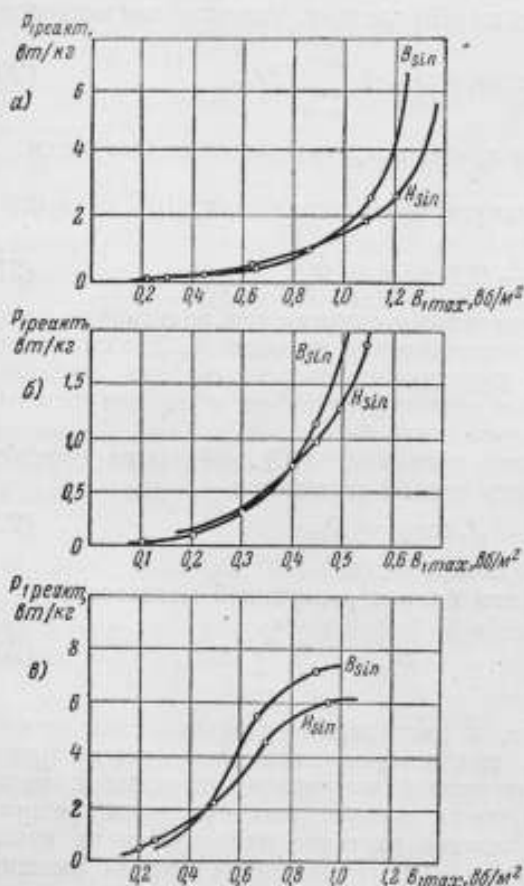


Рис. 3. Кривые $P_{1\text{ реакт}} = f(B_{\text{max}})$ для режимов практически синусоидальной индукции и практически синусоидальной напряженности поля.

а) сталь Э41, $f=50$ гц; б) пермаллой $f=50$ гц; в) сталь Э44, $f=500$ гц.

положить рассмотренные энергетические процессы.

Из формулы (21) следует, что в режиме практически синусоидальной формы тока реактивная мощность первой гармонике расходуется только на намагничивание образца. При данном магнитном состоянии образца (при данном значении магнитной индукции B_1) величина этой мощности определяется реактивной составляющей тока первой гармоники. Следовательно, в этом режиме намагничивающим током является не полный ток первой гармоники, как принято считать [1], а только его реактивная составляющая.

Кроме того, при режиме практически синусоидальной формы тока создаются условия для определения из зависимости $B_{\text{искаж. max}} = f(H_{1 \text{ реакт. max}})$ кривой, которая в максимальной степени приближается к коммутационной основной кривой намагничивания (рис. 4) для образца трубной стали. Близкое совпадение этих кривых при практически синусоидальной форме тока объясняется незначительным размагничивающим действием токов высших гармоник и вихревых токов, вследствие чего кривая магнитной индукции почти сохраняет свою исходную искаженную форму. Это обстоятельство позволяет рекомендовать кривую $B_{\text{искаж. max}} = f(H_{1 \text{ реакт. max}})$ в качестве динамической кривой намагничивания.

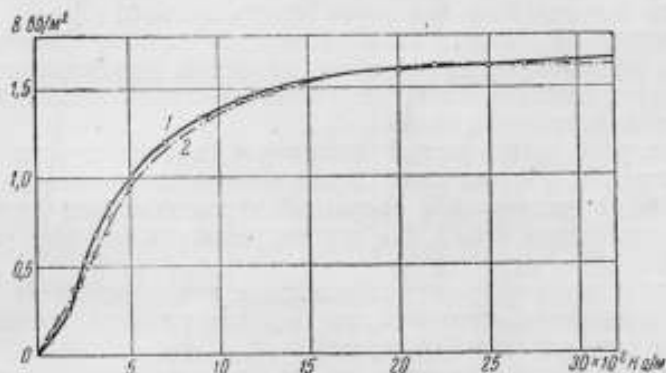


Рис. 4. Сравнение основной коммутационной кривой намагничивания (1) и кривой (2) $B_{\text{искаж. max}} = f(H_{1 \text{ реакт. max}})$, снятой в режиме практически синусоидальной напряженности поля.

При режиме практически синусоидальной формы магнитной индукции часть реактивной мощности первой гармоники, как отмечалось выше, расходуется на подавление высших гармоник магнитной индукции высшими гармониками тока. Следовательно, намагничивающий ток для этого режима, учитывая формулу (23), должен определяться из формулы

$$I_n = I_1' \sin \varphi_1 = \frac{E_1 I_1 \sin \varphi_1 - \sum_{n=2}^{\infty} E_n I_n}{E_1} \quad (24)$$

Принято считать, что площадь динамической гистерезисной петли пропорциональна только потерям в стали. Однако выше отмечалась идентичность причин возникновения вихревых токов и токов высших гармоник. Следовательно, в общем случае площадь динамической гистерезисной петли пропорциональна не только потерям в стали, но, в соответствии с формулой (15), и тепловым потерям, вызванным токами высших гармоник в сопротивлении r_w , т. е. активной мощности первой гармоники.

В подтверждение сказанного ниже приведены результаты измерения потерь тремя методами:

по площади динамической гистерезисной петли . . .	18,4	вт
компенсатором	17,7	·
ваттметром	12,9	·

Как видно, активная мощность, определяемая по площади динамической гистерезисной петли, значительно больше действительных потерь в стали, измеренных ваттметром, и равна в пределах точности измерений активной мощности первой гармоники, определяемой посредством компенсатора переменного тока.

Современные методы инженерных расчетов электрических цепей со сталью основаны на применении комплексной магнитной проницаемости в качестве расчетной характеристики материала. Как известно, в основу ее определения положены эквивалентные синусоиды искаженных кривых $B(t)$ и $H(t)$ и соответствующий им эквивалентный эллипс. Напомним, что эквивалентные значения синусоидальных величин выбираются, в общем случае, произвольно, но при обязательном условии сохранения неизменными величины потерь в стали [5].

Произвольный выбор эквивалентных значений придает комплексной магнитной проницаемости условный характер, что исключает возможность ее применения в качестве магнитной характеристики материала в переменных магнитных полях.

Определение комплексной магнитной проницаемости по первым гармоникам ($B_1; H_1; \alpha_1$) дает возможность применять ее в качестве действительной магнитной и расчетной характеристики материала в переменных магнитных полях. На эту возможность впервые указал проф. Л. М. Нейман [5].

Следует подчеркнуть, что определение комплексной магнитной проницаемости по первым гармоникам повысит точность инженерных расчетов электрических цепей со сталью.

Определение характеристик по первым гармоникам позволяет отображать векторными диаграммами не эквивалентные, а действительные процессы.

Результаты изучения процессов в электрической цепи со сталью и изложенные соображения о целесообразности оценки магнитных свойств материалов по первым гармоникам, дают возможность унифицировать магнитные характеристики материалов в переменных магнитных полях всего диапазона частот, введением в ГОСТ двух основных характеристик:

$$B_{1\max} = f(H_{1\max}); \quad (25)$$

$$P_{\text{ст}} = f(B_{1\max}). \quad (26)$$

Основная характеристика (26) может быть заменена характеристикой

$$\alpha_1 = f(B_{1\max}); \quad (26a)$$

которая, как и характеристика (25), определяется непосредственно при измерениях.

Основные характеристики (25), (26) или (26a), в силу установившихся в настоящее время требований, должны определяться в режимах практически синусоидальной формы магнитной продукции и напряженности поля.

Основные характеристики дают возможность путем несложных расчетов определять зависимость

$$B_{1\max} = f(H_{\text{н. макс}}), \quad (27)$$

где $H_{\text{н. макс}}$ — напряженность поля, рассчитываемая при различных режимах в соответствии с выражениями (21) и (24).

Эта производная характеристика также может быть использована в качестве характеристики магнитных свойств вещества в переменных магнитных полях. О возможности такого использования харак-

теристика (27) свидетельствует близкое совпадение на рис. 5 кривых $B_{1\max} = f(H_{1\text{реакт}})$, снятых для образца стали Э44 толщиной 0,2 мм при частотах 50 и 5000 гц. Для сравнения на том же рисунке приведены кривые основной характеристики

$$B_{1\max} = f(H_{1\max}).$$

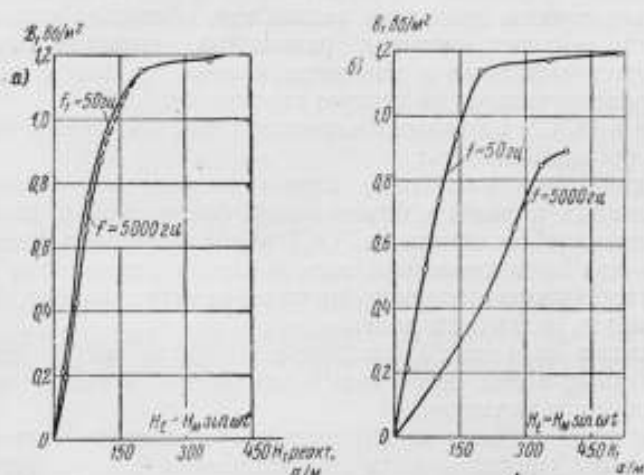


Рис. 5. Сравнение кривых:
 а - $B_{1\max} = f(H_{1\text{реакт}})$; б - $B_{1\max} = f(H_{1\max})$ стали Э44, снятых при частотах $f = 50 \text{ гц}$ и $f = 5000 \text{ гц}$.

Основные характеристики (25), (26) или (26а) позволяют определить все требуемые расчетные характеристики и величины:

1) Угол магнитного запаздывания

$$\alpha_1 = \arctg \left(\frac{I_{1\text{лкт}}}{I_{1\text{реакт}}} \right) \quad (28)$$

или потери в стали

$$P_{\text{ст}} = kB_1 H_1 \sin \alpha_1. \quad (29)$$

2) Комплексную магнитную проницаемость и ее составляющие

$$\dot{\mu}^1 = \frac{\dot{B}_1}{H_1} = \mu_1^1 - j_2^1. \quad (30)$$

3) Тангенс угла потерь

$$\text{tg } \delta_1 = \frac{\mu_2^1}{\mu_1^1}. \quad (31)$$

4) Реактивную мощность

$$P_{1\text{реакт}} = kB_1 H_1 \cos \alpha_1. \quad (32)$$

Кроме того, как было показано, количественная и качественная оценка процессов в намагничивающей цепи образца по величинам первых гармоник дает возможность определять, если необходимо, динамическую кривую намагничивания, приближающуюся к коммутационной кривой намагничивания.

Таким образом, унифицированные характеристики (25), (26) или (26а), отражая основные особенности электрических, магнитных и энергетических процессов, вместе с тем удовлетворяют требованиям магнитных измерений и исследований в переменных магнитных полях и требованиям инженерной практики.

Конечно, введение в ГОСТ унифицированных магнитных характеристик, удовлетворяющих широкий круг основных инженерных требований, не исключает необходимости введения также добавочных характеристик, используемых при специфических расчетах электромагнитных устройств, например магнитных усилителей.

В заключение отметим, что желательность введения характеристик по первым гармоникам диктуется также тем обстоятельством, что при повышенных и высоких частотах основными измерительными средствами являются мостовые и компенсационные схемы с указателями равновесия, реагирующими на первую гармонику.

Введение в ГОСТ магнитных характеристик по первым гармоникам B_1 и H_1 дало бы возможность:

1. Унифицировать магнитные характеристики материалов в переменных магнитных полях на объективной физической и теоретической основе, что позволит исключить из ГОСТ необоснованную рекомендацию, использовать для характеристики материалов в переменных магнитных полях коммутационную основную кривую намагничивания, определяемую в постоянном магнитном поле.

2. Однотипно определять магнитные свойства материалов в переменных магнитных полях всего диапазона частот, а также при подмагничивании постоянным током.

3. Унифицировать методы определения магнитных характеристик, что позволило бы унифицировать магнитоизмерительную аппаратуру и определить направление и пути ее развития и совершенствования.

4. Повысить точность и воспроизводимость определения магнитных характеристик путем применения в качестве основных измерительных средств мостовых, компенсационных и управляемых выпрямительных схем.

5. Автоматизировать процесс определения характеристик путем применения автоматических мостов и компенсаторов переменного тока.

6. Унифицировать методы инженерных расчетов и повысить их точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев Е. Т., Выбор магнитных характеристик при намагничивании ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях, Труды ВНИИМ, вып. 29(89), 1956.
2. Круг А. К., Основы электротехники, ОНТИ, 1936.
3. Розенблат М. А., Сдвиг фаз между первыми гармониками индукции и напряженности поля и измерение потерь в стали, «Электричество», № 4, 1952.
4. Astbury N. F., Some aspects of the theory of iron-testing by wattmeter and bridge methods, „The Journal of the Institution of Electrical Engineers,” v. 95, part II, 1950.
5. Нейман Л. Р., Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, Госэнергоиздат, 1948.

Б. Е. КУБЫШИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОВРЕМЕННОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАСЧЕТА МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Предлагается комплекс характеристик одновременного намагничивания материала, определенных по первым гармоникам индукции и напряженности магнитного поля. Дается метод получения магнитных характеристик вещества, не зависящих ни от частоты источника питания, ни от размеров испытываемого образца.

Режим одновременного намагничивания полями двух различных частот нашел широкое применение в технике [1]. На использовании такого режима и, в частности, режима одновременного намагничивания переменным и постоянным полями, основана работа магнитных усилителей, дросселей подмагничивания, регулируемых трансформаторов с подмагничиваемыми шунтами и с перераспределением напряжения за счет подмагничивания, трансформаторов постоянного тока, стабилизаторов напряжения, статических преобразователей частоты, фазочувствительных выпрямителей и ряда устройств вычислительной и измерительной техники. Несмотря на столь широкий диапазон применения подобных устройств и их большое распространение, техника получения кривых одновременного намагничивания ферромагнетиков находится на весьма примитивном уровне [2, 3].

В настоящее время существует несколько сотен различных схем и разновидностей магнитных усилителей, основная часть которых (дроссели с подмагничиванием) оказывается поставленной в рабочей схеме в различные условия подмагничивания и потребления энергии вышних гармоник. Среди проектировщиков получило распространение мнение, что используемые для расчетов магнитные характеристики должны быть получены для сердечников в условиях, аналогичных их работе в усилителе. Только при таком измерении характеристик удастся обеспечивать более или менее удовлетворительные результаты расчета.

Это происходит потому, что подмагничиваемые устройства существенно нелинейны.

В зависимости от применяемой схемы соединения главных обмоток (параллельное или последовательное), от величины сопротивления этих обмоток (малое или большое), от наличия или отсутствия конденсатора в цепи управления или обратной связи, подмагничиваемые устройства работают в режимах естественного или вынужденного намагничивания.

Естественное намагничивание [4] характеризуется импульсной формой кривой переменного тока, обтекающего обмотки главного тока, а вынужденное — ее прямоугольной формой. Коэффициент формы кривых тока для первых может значительно превосходить единицу, для вторых быть близким или равным единице. И это при условии, что кривая напряжения, приложенного к первичным обмоткам, а следовательно, и кривая индукции — синусоидальны. Естественно, что кривые одновременного намагничивания для каждого из этих случаев будут совершенно различными, хотя и будут измерены для режима синусоидальной индукции и, как представляется многим, должны были быть одинаковыми (рис. 1).

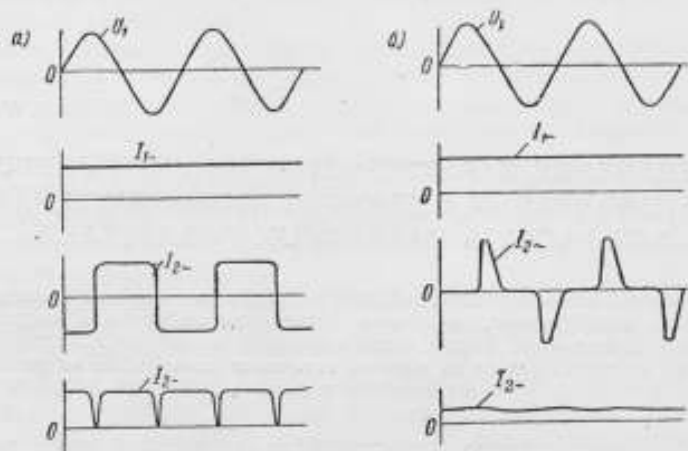


Рис. 1. Формы кривых напряжения питания U_1 , тока подмагничивания I_1 и тока намагничивания до выпрямления I_2^- и после выпрямления I_2^- в режимах а) естественного и б) вынужденного намагничивания.

В реальных условиях подмагничиваемые устройства очень редко работают при синусоидальной индукции или при синусоидальной напряженности поля. Обычно в большей части режимов обе эти величины являются несинусоидальными.

Характеристики одновременного намагничивания, для каких бы режимов они не измерялись и в каких бы величинах — средних или эффективных — эти измерения не делались, являются сугубо условными, и реальные процессы в подмагничиваемых устройствах отражают весьма приближенно. Еще в меньшей мере по этим характеристикам можно оценивать магнитные качества того или иного ферромагнетика, так как два различных исследователя, испытывая один и тот же материал, из-за небольших и, во всяком случае, обычно не учитываемых различий в схеме измерения, не смогут получить эти характеристики одинаковыми. Вопрос же о повышении точности измерений для таких принципиально неоднозначных характеристик представляется нам лишеным смысла. Подмагничиваемое устройство, которым является испытываемый образец, может рассматриваться как нелинейный элемент, генерирующий высшие гармоники за счет энергии основной гармоники, поступающей из сети.

В режиме синусоидальной напряженности поля величины амплитуд высших гармоник индукций определенным функциональным образом связаны с амплитудой основной гармоники индукции и с характером ее за-

в зависимости от амплитуд напряженности поля основной гармоники и подмагничивающего поля. Функциональная связь эта совершенно однозначна для режима, например, синусоидальной напряженности поля. Она может быть определена путем расчета по соответствующей кривой намагничивания ферромагнетика по индукции и напряженности поля основной частоты, измеренной, например, для стали при частоте 50 гц (рис. 2).

Если для э. д. с. нечетных высших гармоник, генерируемых измерительной обмоткой, и для э. д. с. четных гармоник, генерируемых обмоткой подмагничивания, создать достаточно большие сопротивления, чтобы

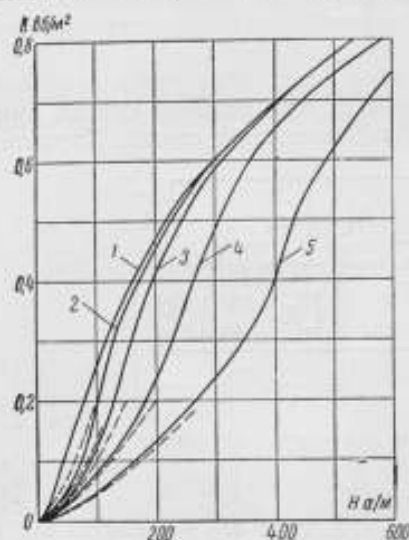


Рис. 2. Кривые одновременного намагничивания переменным H и постоянным H_n полями $B=|H$ для трансформаторной стали толщиной проката $\Delta=0,35$ мм:

1 — $H_n = 0$; 2 — $H_n = 31,3$ а/м; 3 — $H_n = 62,6$ а/м; 4 — $H_n = 125,2$ а/м; 5 — $H_n = 250,4$ а/м.

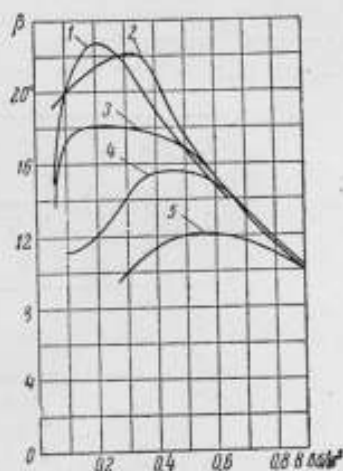


Рис. 3. Зависимость угла магнитного запаздывания β магнитной индукции B от напряженности поля H при подмагничивании постоянным полем H_n трансформаторной стали $\Delta=0,35$ мм: 1 — $H_n = 0$; 2 — $H_n = 31,3$ а/м; 3 — $H_n = 62,6$ а/м; 4 — $H_n = 125,2$ а/м; 5 — $H_n = 250,4$ а/м.

расходуемая мощность высших гармоник была бы минимальной, то такие характеристики одновременного намагничивания по первым гармоникам индукции и напряженности поля окажутся для каждой из частот измерения (для широкого диапазона индукции) практически однозначными.

Однозначные характеристики одновременного намагничивания, измеренные по индукции и напряженности поля основной частоты, можно закономерно дополнить однозначными же кривыми угла магнитного запаздывания β_1 от индукции B_1 при разных напряженностях поля H_1 (рис. 2, 3). А это позволяет с вполне удовлетворительной точностью рассчитывать фазовые соотношения в подмагничиваемых устройствах, определять и выбирать значения потерь, вносимых ими в схему устройства, и тем повышать точность расчета этих устройств. Полученные характеристики будут однозначными магнитными характеристиками материала ферромагнетика как в режиме с подмагничиванием, так и в режиме без подмагничивания и могут быть положены в основу унификации магнитных характеристик ферромагнетиков.

Поскольку подмагничиваемые устройства являются обычно основными элементами схем бесконтактного управления, вопрос об уменьшении потерь в них является очень актуальной задачей. Для решения этого вопроса необходимо разделить измеренные потери на потери от гистерезиса, от вихревых токов, на магнитную вязкость и изучить влияние подмагничивания на каждый из этих видов потерь в отдельности.

Лучшим способом для разделения потерь и анализа закономерностей в их изменении является использование критериев и критериальных уравнений потерь [5].

При вычислении критериев и коэффициентов критериальных уравнений желательно использовать характеристики самого вещества ферромагнетика.

Наиболее просто необходимые данные удастся получить измерением комплексной магнитной проницаемости μ_k при помощи схемы, приведенной на рис. 4, или при помощи другой мостовой схемы. Характери-

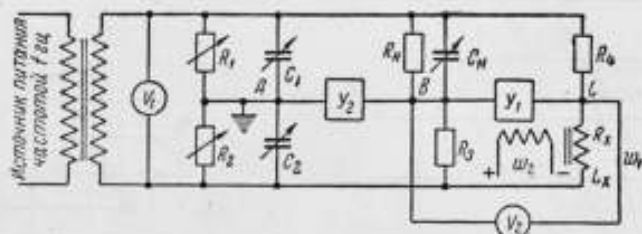


Рис. 4. Принципиальная схема для измерения магнитных характеристик.

стики вещества $\mu_1' = f_1(B_1)$ или $B_1 = f_2(H_1')$ (где H_1' — реактивная составляющая напряженности поля первой гармоники, а μ_1' — магнитная проницаемость вещества ферромагнетика) находятся путем вычисления по данным измерения μ_1 и H_1 при помощи формул:

$$H_1' = H_1 \cdot \cos \beta_1; \quad (1)$$

$$\mu_1' = \frac{\mu_k}{\cos \beta_1}. \quad (2)$$

Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что магнитные характеристики вещества, пересчитанные указанным выше способом для материалов с сильно различающимися магнитными характеристиками, измеренными при разных частотах тока намагничивания в широком диапазоне этих частот с большой точностью, совпадают. Магнитные характеристики, пересчитанные с кривых (рис. 5), измеренных для трансформаторной стали на частотах 50 и 100 гц (где уже не проявляется влияние размеров материала, частоты намагничивающего поля и потерь на высшие гармоники), приведены на рис. 6. Характеристики веществ, вычисленные по формулам (1) и (2), являются самыми объективными и однозначными из всех возможных для определения магнитных характеристик ферромагнетика.

В материалах с большой проницаемостью при достаточно больших частотах вследствие поверхностного эффекта среднее значение амплитуды индукции по сечению листа, получающееся при измерениях, может сильно отличаться от значения амплитуды индукции на его поверхности. Это иной раз может сильно исказить результаты измерения и привести к необходимости внесения поправок.

При пересчете измеренных величин на характеристики вещества при помощи формул (1) и (2) необходимо вносить в последние исправленные значения B_1 , μ_1 и β_1 , для чего могут быть использованы следующие соотношения:

$$\operatorname{tg} \beta_{\text{ист}} = \operatorname{tg} \beta_{\text{изм}} \cdot \bar{Q} = \operatorname{tg} \beta_{\text{изм}} \cdot \frac{3}{\sqrt{2K}^{\frac{1}{2}}} \frac{\operatorname{sh}(2\bar{K})^{\frac{1}{2}} - \sin(2\bar{K})^{\frac{1}{2}}}{\operatorname{ch}(2\bar{K})^{\frac{1}{2}} + \cos(2\bar{K})^{\frac{1}{2}}}, \quad (3)$$

$$\mu_{\text{к ист}} = \mu_{\text{к}} \cdot \bar{T} = \mu_{\text{к}} \cdot \bar{K}^{\frac{1}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\operatorname{ch}(2\bar{K})^{\frac{1}{2}} + \cos(2\bar{K})^{\frac{1}{2}}}{\operatorname{ch}(2\bar{K})^{\frac{1}{2}} - \cos(2\bar{K})^{\frac{1}{2}}}} \approx \mu_{\text{к}} \cdot \frac{1}{\bar{Q}^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

к которым приводит математический анализ эффекта вытеснения потока к поверхности листа [6]. Значения безразмерных величин (критериев

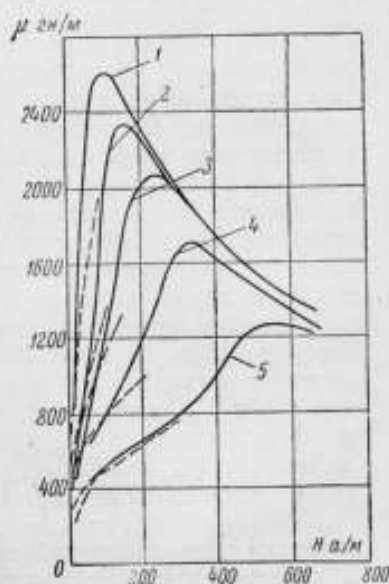


Рис. 5. Кривые модуля комплексной магнитной проницаемости $\mu_{\text{к}}$ для трансформаторной стали $\Delta=0,35$ мм в режиме одновременного намагничивания переменным H и постоянным $H_{\text{п}}$ полями при частоте 50 гц (сплошные линии) и при частоте 1000 гц (пунктир):

1 - $H_{\text{п}} = 0$; 2 - $H_{\text{п}} = 31,3$ а/м; 3 - $H_{\text{п}} = 62,6$ а/м; 4 - $H_{\text{п}} = 125,2$ а/м; 5 - $H_{\text{п}} = 250,4$ а/м.

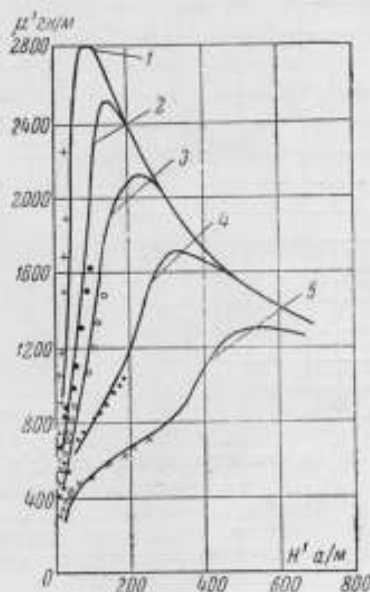


Рис. 6. Кривые магнитной проницаемости μ_1' вещества, рассчитанные по измерениям для трансформаторной стали, приведенным на рис. 5, в режиме одновременного намагничивания постоянным $H_{\text{п}}$ полем (точками обозначен ход кривых, пересчитанных по результатам измерений на частоте 1000 гц):

1 - $H_{\text{п}} = 0$; 2 - $H_{\text{п}} = 31,3$ а/м; 3 - $H_{\text{п}} = 62,6$ а/м; 4 - $H_{\text{п}} = 125,2$ а/м; 5 - $H_{\text{п}} = 250,4$ а/м.

\bar{K} и \bar{Q}) показаны в более ранних работах автора [5]. Для удобства пользования кривые этих значений в функции критерия \bar{K} приведены на рис. 7. Пересчет величин $\mu_{\text{к}}$ и β_1 , измеренных на частоте 1000 гц, значения которых приведены на рис. 5 и 6, производился именно по этим соотношениям. Обоснованность и достаточную точность такого пересчета можно видеть по кривым магнитной проницаемости вещества, приведен-

ным на рис. 6, на котором, пересчитанные с частоты 1000 гц кривые значения магнитной проницаемости вещества изображены точками.

Несколько замечаний относительно техники измерений характеристик материала по первым гармоникам в режиме подмагничивания по схеме рис. 4. Указатель U_1 должен быть избирательным по частоте основной гармоники.

Система и потребление вольтметра V_2 , включаемого на второй диагонали моста, далеко не безразличны. Он предназначен для измерения эффективного суммарного напряжения V_2 нечетных гармоник на этой диагонали в уравновешенном состоянии моста. Переключением вольтметра V_2 может быть произведено измерение эффективного сум-

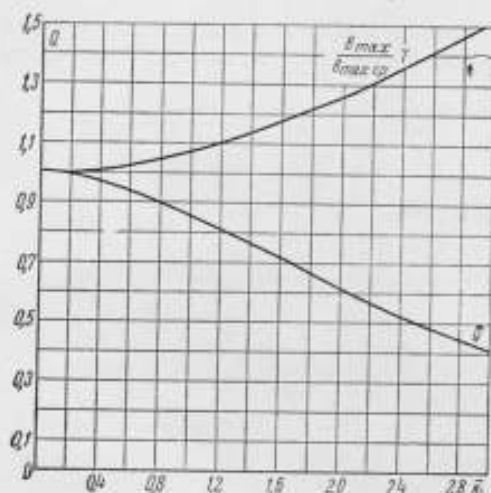


Рис. 7. Зависимость критериев \bar{Q} и \bar{T} от критерия \bar{K} , рассчитанная по формулам (3) и (4). $B_{\text{max ср}}$ — среднее по сечению листа значение амплитуды индукции, а B_{max} — значение амплитуды индукции на поверхности листа.

марного напряжения V_3 четных гармоник в уравновешенном состоянии моста на обмотке подмагничивания.

Если значение сопротивления плеча R_4 или добавочного сопротивления в цепи подмагничивания R_d выбрать раз в десять или в большее число раз превышающим полное кажущееся сопротивление соответствующих обмоток образца (т. е. омическое сопротивление самих обмоток и сопротивление их индуктивности рассеяния), а сопротивление входа вольтметров, измеряющих V_2 и V_3 , выбрать достаточно большим, то эти напряжения могут приниматься равными эффективному суммарным напряжениям гармоник на зажимах измеряемого образца. В качестве наиболее подходящего для этих целей вольтметра может быть применен вольтметр КМВЛ-1 с сопротивлением входа порядка 1 Мом . Образец, на котором производится измерение характеристик намагничивания, должен быть выполнен на двух сердечниках, несущих по две одинаковые катушки, из которых одна пара катушек разных сердечников соединяется последовательно, а другая относительно первой пары встречно-последовательно, чтобы в процессе измерения отдельных точек характеристики на второй паре не было наводок э. д. с. основной гармоники. Такое исполнение образца желательно еще и потому, что пересоединение вторичных катушек (перед началом определения характеристик) на последовательное согласованное соединение позволяет произвести измерение индуктивности рассеяния ωL_1 первичных катушек образца и сопротивления их обмотки r_1 . После измерения L_1 и r_1 вторичные обмотки следует соединить вновь встречно-последовательно и, подавая требуемые напряжения, измерять сопротивление R_x и индуктивность L_x образца. Результаты измерения и последующий расчет фактических магнитных характеристик одновременного намагничивания для данной частоты ω и пересчет их в характеристику вещества рекомендуется записывать по форме 1.

$I_n = 0, H_n = 0$, материал — трансформаторная сталь

1	2	3	4	5	6	7	8	$Z_{ж1}$ (ом)		9	10	11	12	13	14	15	16	17	
								$a + jb$	$Z e^{j\alpha_1}$										
$U_{вх}$ в	C_n мкф	R_n ом	R_x ом	L_x мГ	Z_x ом	$Z_{обш}$ ом	I_x а			β_1 град	$U_{ж}$ в	B_1 вб/м ²	H_1 а/м	ρ_k гн/м	H_1' а/м	ρ_1' гн/м			

В графы 1, 2, 3 заносятся результаты произведенных измерений, графы 4 и 15 рассчитываются по соотношениям (5), графы 16 и 17 по соотношениям (1, 2) и после расчета граф 11, 13, 14 и 15 и учета, если это требуется, с помощью критерия \bar{Q} (см. выше) вытеснения потока:

$$R_x = \frac{R_3 R_4}{R_n}; \quad L_x = R_3 R_4 C_n; \quad Z_x = R_x + j\omega L_x;$$

$$Z_{обш} = R_n + R_x + j\omega L_x = |Z_{обш}| \cdot e^{j\varphi};$$

$$2Z_{ж1} = R_x - r_1 + j\omega(L_x - L_1) = 2|Z_{ж1}| e^{j\alpha_1}; \quad \beta_1 = \alpha_1 - 90;$$

$$I_x = \frac{U_{вх}}{|Z_{обш}|}; \quad U_{ж} = I_x 2Z_{ж1}; \quad B_1 = \frac{U_{ж} \sqrt{2}}{2\omega w_1 S}; \quad H_1 = \frac{I_x w_1 \sqrt{2}}{l_x};$$

$$H_n = \frac{I_n w_2}{l_n}; \quad \rho_k = \frac{B_1}{H_1}. \quad (5)$$

Здесь S — фактическое сечение каждого из двух магнитопроводов образца в m^2 , l_x — длина силовой линии магнитного потока образца в m , а w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток на каждом из двух сердечников образца. Результаты расчетов в соответствии с формой 1 позволяют построить магнитные характеристики ферромагнетика, подобные приведенным на рис. 5 для режима без подмагничивания ($I_n = 0$ и $H_n = 0$). Аналогичные расчеты делаются и при каждом из выбранных токов подмагничивания в цепи обмотки w_2 . Затрудняющие некоторых исследователей операции перехода от алгебраической формы комплексного числа к его тригонометрической форме и обратно легко и просто осуществляются на логарифмической линейке [7]. Точность этих операций вполне достаточная.

Характеристики вещества (рис. 6, 8) позволяют разделить потери, применив для этого критериальное уравнение типа, описанное ранее [5]. Для

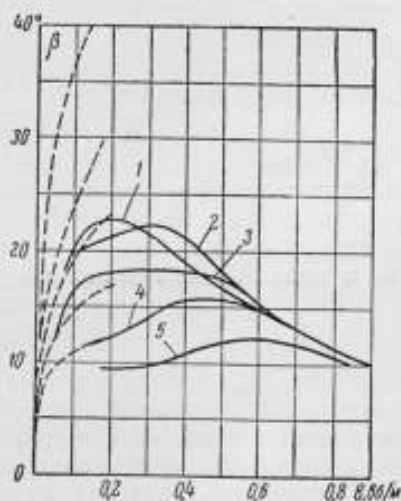


Рис. 8. Угол магнитного запаздывания магнитной индукции B от H , вычисленный для поверхности листа стали толщиной $\Delta = 0,35$ мм при частоте 50 гц (сплошные линии) и при частоте 1000 гц (пунктир):

1 — $H_n = 0$; 2 — $H_n = 31,3$ а/м; 3 — $H_n = 62,6$ а/м; 4 — $H_n = 125,2$ а/м; 5 — $H_n = 250,4$ а/м.

составления критериального уравнения используются пять безразмерных соотношений (критериев), введенных нами ранее (1—5), и два новых критерия (6 и 7):

$$1) \bar{P} = \frac{P\gamma}{B_1 H_1' \omega} = \text{tg } \beta_1 - \text{критерий относительной величины удельных (общих) потерь } P \text{ вт/кг в ферромагнетике плотностью } \gamma \text{ (кг/м}^3\text{) при индукции в магнитопроводе } B_1 \text{ вб/м}^2 \text{ и напряженности поля } H_1', \text{ расходуемой только на намагничивание.}$$

2) $\bar{X} = \frac{\mu_1'}{\mu_{1\text{max}}'}$ — критерий относительной магнитной проницаемости вещества, характеризующейся текущим μ_1' и максимальным $\mu_{1\text{max}}'$ ее значениями.

3) $\bar{X}_d = \frac{\mu_d'}{\mu_{d\text{max}}'}$ — критерий относительной дифференциальной проницаемости вещества, характеризующейся текущим $\mu_d' = \frac{dB_1}{dH_1}$ гн/м и максимальным $\mu_{d\text{max}}'$ ее значениями.

4) $\bar{K} = \omega \Delta_1^2 \delta \mu_1' = \bar{X} \omega \Delta_1^2 \delta \mu_{1\text{max}}' = \bar{X} \cdot \bar{K}_{\text{max}}$ — критерий меры поверхностного эффекта в ферромагнетике, приводящего к частичному вытеснению к поверхности листа потока $\Phi_1 = B_1 S$, изменяющегося с угловой частотой ω 1/сек при определяющем размере материала (например, при толщине листа $2\Delta_1$ м) и при удельной электропроводности ферромагнетика δ 1/ом·м.

5) $\bar{K}_d = \omega \Delta_2^2 \delta \mu_d' = \bar{X}_d \omega \Delta_2^2 \delta \mu_{d\text{max}}' = \bar{X}_d \cdot \bar{K}_{d\text{max}}$ — критерий дифференциального поверхностного эффекта в ферромагнетике, являющегося мерой отставания намагничивающей силы ($I_x \omega_1$) от напряженности поля при определяющем размере материала $2\Delta_2$ м; в качестве последнего может быть принята также толщина листа (тогда $\Delta_1 = \Delta_2$) или средний радиус зерна ферромагнетика.

6) $\bar{K}_n = \frac{V \sum U_n^2}{U_{ж1}^2} = \frac{V \sum B_n^2}{B_1^2}$ — критерии меры нелинейных искажений, равные коэффициентам нелинейных искажений по четным и нечетным гармоникам, характеризующихся наибольшими значениями измеренных эффективных суммарных напряжений высших гармоник V_2 и V_3 и напряжением основной гармоники на измеряемом образце $U_{ж1}$ в режиме практически синусоидальной напряженности поля H_1 .

7) $\bar{r}_n = \frac{R_n}{2Z_{ж}}$ — критерий относительной величины активного сопротивления R_n измерительной или рабочей схемы для генерируемых (измеряемыми элементами) высших гармоник по отношению к сопротивлению соответствующих обмоток измеряемого образца (по первой гармонике) $2Z_{ж}$ или к его реактивной составляющей ($X_{ж} \approx Z_{ж}$).

Общий вид критериального уравнения потерь, предлагаемого автором,

$$\bar{P} = \text{tg } \beta_{\text{инст}} = \left(C_{g1} \frac{\bar{X}_d}{\bar{X}} + C_{g2} \frac{\bar{K}_d}{\bar{X}} \bar{X} + C_r \bar{X} + C_b \cdot \bar{K} \right) \bar{Q} + \sum C_n \frac{\bar{K}_n^2}{r} \quad (6)$$

В этой формуле C_{g1} ; C_{g2} ; C_r ; C_b ; C_n — постоянные коэффициенты для данного ферромагнетика и данного режима его подмагничивания постоянным полем, определяемые по измерениям характеристик одновременного намагничивания для двух разных частот или для двух разных размеров материала. Техника этого определения проста и изложена

в статье автора [5]. Члены уравнения $C_{g1} \frac{\bar{X}_d}{X}$; $C_{g2} \frac{\bar{K}_d}{X}$; $C_r \bar{X}$; $C_b \bar{K}$ и

$\sum C_n \frac{\bar{K}_n^2}{r}$ — это относительные значения потерь на частотнезависимую и частотнозависимую магнитную вязкость, на гистерезис, вихревые токи и на высшие гармоники. В уравнение (6) в безразмерной форме входит частота намагничивающего тока, размеры материала, его электропроводность и другие параметры, позволяющие от характеристик вещества совершить переход к характеристикам материала и к конкретным условиям его работы, пересчитав характеристику вещества на характеристику материала.

Несколько слов относительно возможности расчета магнитных усилителей по предлагаемым характеристикам одновременного намагничивания, измеренным по амплитудам первой гармоники индукции и напряженности поля.

В Институте электротехники такая возможность проверялась [8] и оказалось, что при расчетах магнитных усилителей по первым гармоникам приходится применять ряд коэффициентов, отражающих те или иные их особенности, вообще, и их схем, в частности. К числу таких коэффициентов относятся, например, $k' = \frac{\Delta H_c}{\Delta H_n}$; $\mu_d = \frac{dB}{dH}$, коэффи-

циент формы тока k_ϕ , параметр H_0 , характеризующий участок, подвергнутый линеаризации, и др. Возможно, что придется ввести еще добавочные коэффициенты. Все коэффициенты, не зависящие от схем магнитных усилителей, поддаются определению из измеренного семейства кривых; зависящие от схем — находятся дополнительными экспериментами. Опыт показал, что такие расчеты вполне возможны, а в ряде случаев и более точны, чем расчеты по характеристикам, определенным по средним значениям индукции и напряженности поля. Они позволяют, например, учитывать фазовые соотношения в магнитных усилителях и уменьшать благодаря этому расход активных материалов на единицу управляемой магнитным усилителем мощности.

Предлагаемый способ измерения магнитных характеристик не предназначен для замены многих известных способов оценки качества сердечников и характеристик магнитных усилителей для их разбраковки и т. д. Однако в настоящее время назрела настоятельная потребность в унификации характеристик магнитных материалов как в режимах одновременного намагничивания постоянным полем, так и без подмагничивания.

Выводы

1. Из характеристик одновременного намагничивания по индукции и напряженности поля первой гармоники, измеренных для данной частоты и данных размеров материала ферромагнетиков, имеется возможность путем элементарно простой операции пересчета получать однозначные магнитные характеристики вещества ферромагнетиков, не зависящие ни от частоты источника, ни от размеров образца, и позволяющие совершенно объективно и однозначно оценивать их магнитные качества. В частности, имеется возможность однозначного определения потерь и их простого разделения по основным видам: на магнитную вязкость, гистерезис и вихревые токи. Это обстоятельство позволяет изучить влияние одновременного намагничивания на каждый из видов потерь в отдельности, найти пути уменьшения потерь и улучшения маг-

нитных свойств ферромагнетиков, предназначенных для работы в устройствах с подмагничиванием.

2. Примененные в настоящей работе способы измерения магнитной индукции, напряженности поля первой гармоники и потерь на высшие гармоники совершенно не искажают магнитных характеристик одновременного намагничивания и позволяют осуществлять эти измерения с высокой точностью.

3. Комплекс предлагаемых характеристик одновременного намагничивания: зависимости первой гармоники индукции от первой гармоники напряженности поля, угла магнитного запаздывания и значения потерь на высшие гармоники от первой гармоники индукции, измеренных в режиме синусоидальной напряженности поля, позволяет значительно уточнить расчет устройств с подмагничиванием за счет учета возникающих в них фазовых соотношений.

4. Сказанное выше дает основание считать, что определение характеристик одновременного намагничивания ферромагнитных материалов наиболее однозначно и точно может быть выполнено измерением индукции и напряженности поля первой гармоники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бозорт Р., Ферромагнетизм, Издательство иностранной литературы, 1956.
2. Чернышева Н. Г., Чечурина Е. Н., «Исследования в области магнитных измерений», Труды институтов Комитета, вып. 43(103), Стандартгиз, 1960.
3. Чечурина Е. Н., «Исследования в области магнитных измерений», Труды институтов Комитета, вып. 43 (103), Стандартгиз, 1960.
4. Гейгер В. А., Схемы магнитных усилителей, Госэнергоиздат, 1959.
5. Кубышин Б. Е., Сборник трудов ИЭ АН УССР, вып. 7, 1951; вып. 12, 1955; «Вопросы магнитных измерений», вып. 15, 1959.
6. Калантаров П. Л., Теория переменных токов, Госэнергоиздат, 1940.
7. Садовский А. С., Сборник задач по курсу теории электрической связи, Госиздат по вопросам связи и радио, 1954.
8. Кубышин Б. Е., Сборник трудов ИЭ АН УССР, № 16, «Вопросы устойчивости и автоматики энергетических систем», 1959.

Н. А. СЕМЕНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ В ЦЕПИ ГАЛЬВАНОМЕТРА ПРИ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ ПАРАМЕТРОВ СПЛАВОВ ТИПА ПЕРМАЛЛОЙ

Статья посвящена исследованию длительности импульсов в цепи баллистического гальванометра и выяснению ее влияния на результаты измерения магнитных характеристик различных марок сплавов типа пермаллой.

Анализ движения подвижной системы баллистического гальванометра и вывод обычных уравнений основаны на предположении, что к моменту начала движения импульс тока уже окончен. В реальных условиях движение всегда начинается раньше окончания импульса. Чтобы возникающая при этом погрешность была незначительной, гальванометр должен обладать достаточно большим по сравнению с длительностью импульса периодом свободных колебаний.

Влияние длительных импульсов на режим работы и погрешности гальванометра изучали Янус Р. И., Шебалина Е. Ф., Михневич М. Н., Чернышев Е. Т. [1], Ермакова А. М. [2], Харченко Р. Р. [3], Егоров Г. Е. [4] и др.

Однако вопрос о процессах, происходящих в баллистической цепи при измерении высокопроницаемых магнитномягких сплавов, в литературе не освещен.

Из общей теории баллистического гальванометра, без допущения бесконечной малости измеряемого импульса, вытекает уравнение отклонения гальванометра следующего вида:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = f\left(\frac{t}{T}\right), \quad (1)$$

где α — максимальное отклонение;

α_0 — максимальное отклонение при мгновенном импульсе;

t — длительность импульса;

T — период свободных колебаний гальванометра.

Решение этого уравнения зависит от формы импульса тока и может быть получено только для простейших случаев (например, синусоидальный импульс, экспоненциальный). В реальных условиях при измерении высокопроницаемых сплавов с коммутацией тока импульс имеет сложную форму и расчету не поддается.

Для качественной, весьма приближенной, оценки погрешности $\Delta\tau$ от длительного импульса может служить следующая формула:

$$\Delta\tau = -1,6 \frac{t^2}{T^2}. \quad (2)$$

Этой формуле соответствует часто рекомендуемое в литературе соотношение, при котором погрешность гальванометра не превышает 1%

$$\omega_0 t = 0,5, \quad (3)$$

где $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ — частота свободных колебаний подвижной системы гальванометра.

При испытании кольцевых образцов магнитномягких сплавов импульсы большой длительности могут возникать вследствие трех основных причин: значительного времени проникновения магнитного потока в образец из-за поверхностного эффекта, большой индуктивности образца и магнитной вязкости сплава.

Для высокопроницаемых сплавов типа пермаллой поверхностный эффект оказывает заметное влияние на результаты измерения при толщинах образцов, начиная с 2 мм; при этом время проникновения потока может составлять по ориентировочным расчетам до 1—2 сек и вызвать погрешности гальванометра порядка 0,5—1%. Однако лист толщиной 2 мм и более применяется очень редко, поэтому в работе исследовались толщины до 1 мм, когда влияние поверхностного эффекта практически исключалось.

Влияние индуктивности всегда может быть ограничено рациональным выбором веса образца и числом витков измерительной обмотки. В исследовавшихся образцах максимально возможная длительность импульса, обусловленная индуктивностью образца, составляла по ориентировочному расчету не более 0,2—0,3 сек и практически не вызывала погрешностей гальванометра.

Таким образом, характер исследовавшихся импульсов, если длительность их составляла более 0,3 сек, был обусловлен замедлением процесса перемагничивания вследствие магнитной вязкости сплава.

Для оценки влияния магнитной вязкости при измерении была проведена запись баллистических импульсов для кривой намагничивания образцов сплава 79НМ (молибденовый пермаллой) и сплава 65НП (пермаллой с 65% Ni, имеющий прямоугольную петлю) с толщиной проката от 1 мм до 0,003 мм. Для записи использовался магнитоэлектрический осциллограф Н-700 и гальванометры с повышенными чувствительностью и частотой собственных колебаний, специально изготовленные Институтом физики Земли.

Гальванометры осциллографа включались в измерительную цепь вместо баллистического гальванометра, запись производилась в момент коммутации тока. Для контроля масштаба времени одновременно записывалась синусоида частотой 50 гц.

На рис. 1—5 показаны наиболее характерные импульсы при испытании сплава 79НМ (0,35 мм) и сплава 65НП (0,35; 0,05; 0,02 и 0,01 мм). За длительность импульса принималось время от начала первого импульса, соответствующего выключению тока при коммутации, до окончания второго импульса, соответствующего включению тока при коммутации.

Полученные результаты проведенной работы позволили установить следующее:

1. Для сплава 79НМ (от 1 до 0,003 мм) процесс перемагничивания протекает достаточно быстро. Наибольшие длительности импульсов

(1,5—2 сек) наблюдаются для толщин 1 и 0,35 мм, что соответствует погрешности гальванометра не более 1%.

При толщине проката меньшей 0,35 мм процесс перемагничивания заканчивается не более чем за 0,3—0,5 сек. Такая длительность импульсов не вызывает заметных погрешностей гальванометра.

2. В сплаве 65НП процесс перемагничивания протекает медленнее, чем в сплаве 79НМ, что вызывает заметные погрешности гальванометра.

Наибольшие длительности процесса перемагничивания наблюдались при толщине проката 0,35 мм и составляли до 5—8 сек. Возникающие при этом погрешности гальванометра с периодом свободных колебаний $T = 24$ сек составляют более 10%. Показания гальванометра с меньшим периодом колебаний (12—18 сек) будут соответственно ниже.



Рис. 1. Баллистические импульсы сплава 79НМ (0,35 мм) при:

а — $H = 0,008$ а; $\mu = 50\,000$ гс/а; $t < 0,5$ сек; $n = 200$ вит.; б — $H = 0,0112$ а; $\mu = 190\,000$ гс/а; $t = 1,2$ сек; $n = 200$ вит.; в — $H = 0,0128$ а; $\mu = 225\,000$ гс/а; $t = 1,7$ сек; $n = 200$ вит.; г — $H = 0,016$ а; $\mu = 250\,000$ гс/а; $t = 1,2$ сек; $n = 200$ вит.

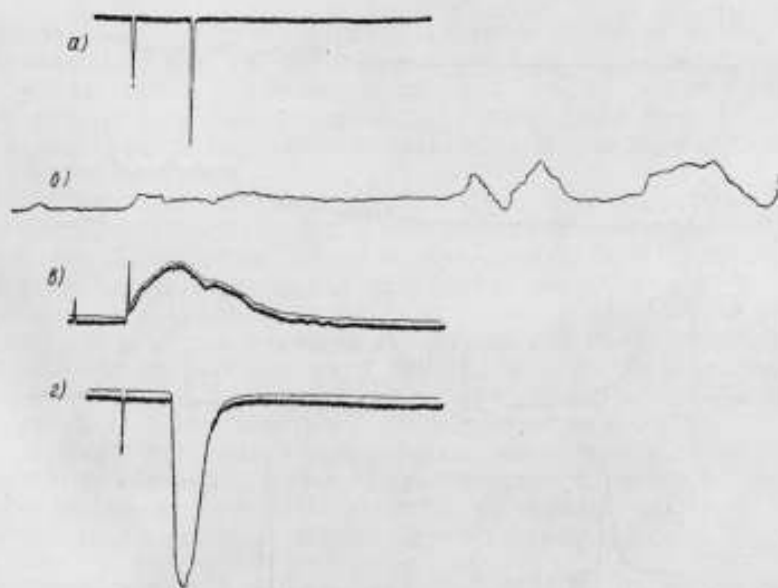


Рис. 2. Баллистические импульсы сплава 65НП (0,35 мм) при:

а — $H = 0,005$ а; $t < 0,3$ сек; $\mu = 10\,000$ гс/а; б — $H = 0,024$ а; $t = 5$ сек; $\mu = 355\,000$ гс/а; в — $H = 0,032$ а; $t = 1,5$ сек; $\mu = 367\,000$ гс/а; г — $H = 0,04$ а; $t = 0,8$ сек; $\mu = 320\,000$ гс/а.

При больших и меньших толщинах проката импульсы заканчивались быстрее: за 2,5—3 сек при толщинах 1; 0,1; 0,05 и 0,02 мм (погрешности гальванометра с $T = 24$ сек при этом около 2—3%; за 1,2 сек при

толщине 0,01 мм (погрешности менее 1%) и за 0,5 сек при толщине 0,003 мм.

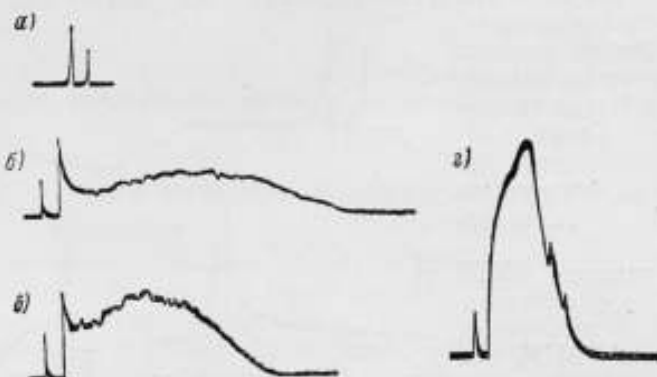


Рис. 3. Баллистические импульсы сплава 65НП (0,05 мм) при:
 а — $H = 0,0453$ э; $\mu = 2400$ эс/э; $t = 0,3$ сек; $n = 300$ вит.; б — $H = 0,0553$ э;
 $\mu = 148\,000$ эс/э; $t = 2,7$ сек; $n = 300$ вит.; в — $H = 0,0603$ э; $\mu = 186\,000$ эс/э;
 $t = 1,8$ сек; $n = 300$ вит.; г — $H = 0,0725$ э; $\mu = 187\,000$ эс/э; $t = 0,8$ сек;
 $n = 300$ вит.

3. У обоих исследованных сплавов была обнаружена заметная магнитная вязкость, определяющая форму и длительность баллистических импульсов и зависящая от величины намагничивающего поля.



Рис. 4. Баллистические импульсы сплава 65НП (0,02 мм) при:
 а — $H = 0,06$ э; $\mu = 3500$ эс/э; $t = 2,8$ сек; $n = 500$ вит.; б — $H = 0,065$ э;
 $\mu = 8500$ эс/э; $t = 3$ сек (5 сек); $n = 500$ вит.; в — $H = 0,0755$ э; $\mu = 134\,000$ эс/э;
 $t = 1,8$ сек; $n = 150$ вит.; г — $H = 0,0905$ э; $\mu = 131\,000$ эс/э; $t < 0,5$ сек;
 $n = 25$ вит.; д — $H = 0,1$ э; $\mu = 122\,000$ эс/э; $t < 0,5$ сек; $n = 25$ вит.

В области слабых полей импульсы имеют экспоненциальную форму, магнитная вязкость не проявляется (рис. 1—3).

В области крутого возрастания намагниченности, особенно вблизи максимальной проницаемости, процесс намагничивания замедляется.

На кривых импульсов сплава 79НМ появляются ступеньки (рис. 1), указывающие на запаздывание изменений намагниченности по отношению к изменению напряженности поля, т. е. на магнитную вязкость.

У сплава 65НП магнитная вязкость проявляется в еще большей степени, чем у сплава 79НМ, причем не только в области крутого возрастания намагниченности, но и в более слабых полях. Импульсы имеют искаженную форму. Причем возникают не только ступеньки, но даже новые подъемы, полностью нарушающие экспоненциальный ход кривой (рис. 2—5).

На кривых импульсов появляются многочисленные зубцы, сви-



Рис. 5. Баллистические импульсы сплава 65НП (0,01 мм) при:

а — $H = 0,039$ э; $\mu = 36\,000$ эс/э; $t = 1,2$ сек; $n = 300$ вит.; *б* — $H = 0,085$ э; $\mu = 111\,000$ эс/э; $t = 3$ сек; $n = 300$ вит.; *в* — $H = 0,085$ э; $\mu = 111\,000$ эс/э; $t = 2$ сек; $n = 500$ вит.; *г* — $H = 0,093$ э; $\mu = 125\,000$ эс/э; $t = 1$ сек; $n = 50$ вит. *д* — $H = 0,1$ э; $\mu = 120\,000$ эс/э; $t = 1$ сек; $n = 300$ вит.

детельствующие о небольших скачках намагниченности. Для образцов толщиной 0,02 и 0,01 мм небольшие запаздывающие скачки намагниченности наблюдаются в течение нескольких секунд после окончания основного импульса. Так, на одной из осциллограмм (рис. 4) основной импульс закончился за 3 сек, а запаздывающие скачки наблюдались в течение еще двух секунд.

Запаздывающие скачки могут явиться причиной нерегулярного характера изменений намагниченности при изменении напряженности поля. На рис. 4 и 5 показаны импульсы для сплава 65НП разной формы и длительности, полученные для одних и тех же изменений поля. Такие нерегулярности затрудняют измерения, вызывая неповторяющиеся показания гальванометра и иногда неплавный ход рамки гальванометра.

В области за максимальной проницаемостью магнитная вязкость уменьшается, характер импульса вновь приближается к экспоненциальному (рис. 2, 4), длительность импульса становится меньше.

У сплава 79НМ магнитная вязкость наблюдалась не во всех исследованных образцах, а только при толщине 1; 0,35 и 0,2 мм. При меньших толщинах магнитная вязкость на осциллограммах не отмечалась — импульсы имели экспоненциальную форму и меньшую длительность.

В сплаве 65НП, в отличие от сплава 79НМ, магнитная вязкость и искажение импульсов наблюдались во всех исследованных образцах толщиной от 1 до 0,003 мм.

Выводы

Исследование импульсов в цепи баллистического гальванометра при измерении магнитных свойств сплавов типа пермаллой разной толщины показало следующее.

Форма и длительность импульсов для этих сплавов определяется в значительной степени магнитной вязкостью, которая замедляет процесс перемагничивания и может быть причиной неповторяющихся показаний гальванометра.

Для высокопроницаемого сплава 79НМ толщиной 1—0,003 мм процесс перемагничивания протекает достаточно быстро (не более 1,5—2 сек), что не дает больших погрешностей при измерениях баллистическим гальванометром.

Для сплава с прямоугольной петлей 65НП процесс перемагничивания протекает значительно медленнее (до 5—8 сек), что вызывает заметные погрешности гальванометра, уменьшая результаты измерения.

Полученные данные еще раз указывают на необходимость изучения поведения сплавов в процессе намагничивания и измерения, так как это может оказывать решающее влияние на результаты магнитных испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев Е. Т., Труды ВНИИМ, вып. 1(43), 1940.
2. Ермакова А. М., Методика определения магнитных характеристик материалов с большой коэрцитивной силой, Диссертация, ВНИИМ, Ленинград, 1949.
3. Харченко Р. Р., «Электричество», № 5, 1953.
4. Егоров Г. Е., Погрешности баллистических гальванометров при измерениях в цепях с индуктивностью с ферромагнитными сердечниками, Диссертация, ВНИИМ, Ленинград, 1954.

О. Н. АЛЬТГАУЗЕН

К МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МАГНИТНОМЯГКИХ СПЛАВОВ

В статье рассмотрены вопросы методики определения начальной проницаемости магнитномягких сплавов (электротехническая кремнистая сталь, железоникельмолибденовые сплавы, железоалюминиевые сплавы и др.). Приведены результаты исследований условий размагничивания, магнитной подготовки и т. п.

Одной из нормируемых магнитных характеристик магнитномягких сплавов является начальная проницаемость μ_a , определяемая как предельное значение магнитной проницаемости вещества, когда напряженность магнитного поля H_i и магнитная индукция B бесконечно малы

$$\mu_a = \lim \frac{B}{H_i}; \text{ при } B \rightarrow 0; H_i \rightarrow 0.$$

По эмпирическому закону Релея в области малых полей для большинства ферромагнетиков зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля может быть выражена формулой

$$\mu = \mu_a + \nu H,$$

где μ — проницаемость на кривой коммутирования при напряженности поля H ;

μ_a — начальная проницаемость;

ν — постоянная.

В настоящее время этой формулой широко пользуются для определения начальной проницаемости μ_a путем экстраполяции кривой $\mu(H)$ к нулевому значению поля H .

Экстраполяция к нулевому значению поля дает правильные результаты в том случае, когда кривая $\mu(H)$ в слабых полях представляет собой прямую линию. Однако у некоторых материалов кривые проницаемости в слабых полях отклоняются от прямой и загибаются вниз. Значение μ_a в этом случае будет существенно зависеть от того, с каких полей проведена экстраполяция.

На рис. 1—4 приведены кривые зависимости проницаемости от напряженности поля для некоторых магнитномягких сплавов. Измерения проводились баллистическим методом на кольцевых образцах весом 20—50 г, сразу после размагничивания образцов переменным полем частотой 50 гц на установке РУ. Как видно, значительное отступление

от линейной зависимости проницаемости от поля, наблюдавшееся ранее главным образом для электротехнической кремнистой стали, имеет место также для железоникельмолибденовых сплавов 79НМ и 79НМА и

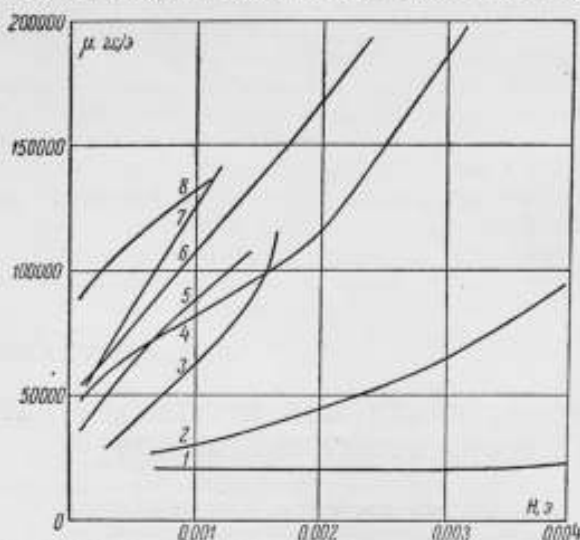


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля сплава 79НМА (0,35 мм). 1 — 8 — номера образцов.

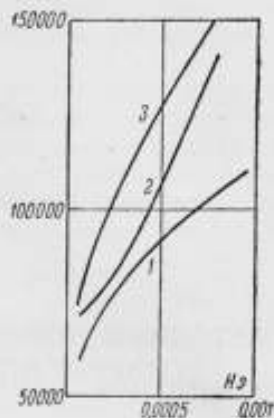


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для сплава 79НМ (0,35 мм). 1 — 3 — номера образцов.

железоалюминиевого сплава 16Ю (алфенол). Зависимость магнитной проницаемости от поля для восьми образцов сплава одного химического

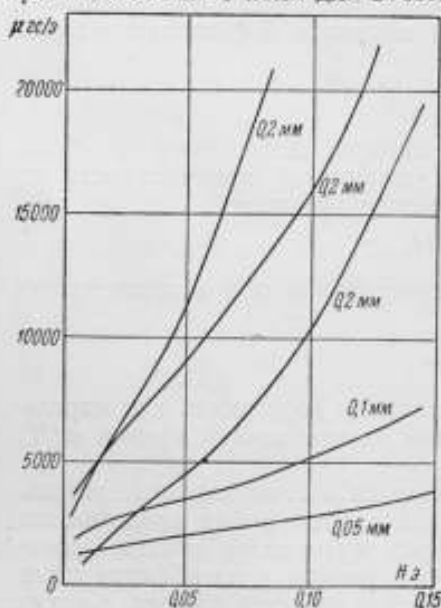


Рис. 3. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для электротехнической кремнистой стали (3% Si).

состава (рис. 1) может быть выражена прямой 1, параллельной оси поля, кривой 2, обращенной выпуклостью вниз, причем магнитная проницаемость плавно увеличивается с увеличением поля, или кривой 8, обращенной выпуклостью вверх при плавном или резком возрастании проницаемости при увеличении поля. Форма кривой зависит от структурного состояния сплава и может быть изменена термической обработкой его.

На рис. 5 приведены кривые для образцов одной плавки 79НМА, полученные после высокотемпературного отжига с медленным охлаждением ниже 600° или с быстрым охлаждением и последующим отпуском при 480°. При незначительной разнице в величине максимальной проницаемости форма кривой в слабых полях существенно различна.

Сложная форма кривой зависимости проницаемости от поля, быстрый спад ее к малым значениям

последнего в ряде случаев делают невозможным определение начальной проницаемости методом экстраполяции. В тех случаях, когда наблю-

дается плавное, но не линейное изменение проницаемости, при определении величины начальной проницаемости методом экстраполяции даже в самых слабых полях, могут быть допущены большие ошибки. Так,

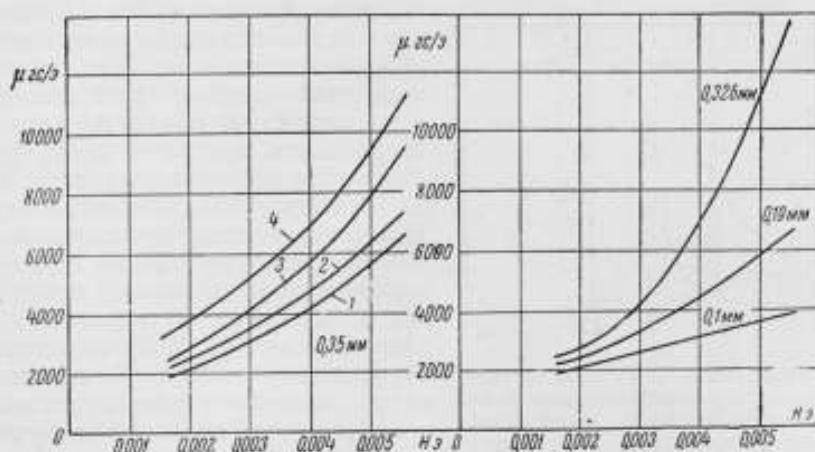


Рис. 4. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для сплава 16Ю.
1—4 — номера образцов.

при экстраполяции для образца алфенола (рис. 4) толщиной 0,19 мм в интервале полей 1,5—4 мэ получается начальная проницаемость

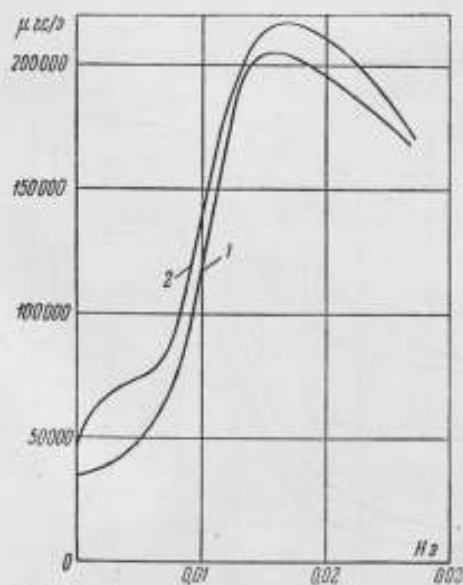


Рис. 5. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для сплава 79НМА (0,05 мм).
1 — медленное охлаждение после 600°С; 2 — быстрое охлаждение после 600°С и отпуск при 480°С.

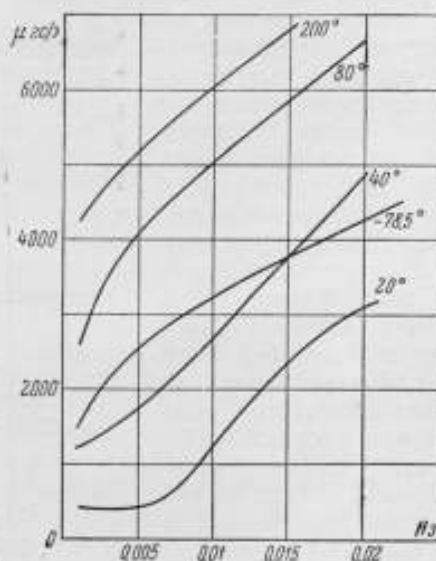


Рис. 6. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для электротехнической кремнистой стали (3% Si) при различных температурах.

700 гс/э, а в интервале 2,5—5 мэ экстраполяция невозможна, так как кривая пересекает ось проницаемости ниже нуля.

Форма кривой в слабых полях может существенно зависеть от температуры, даже при малых изменениях последней. На рис. 6 приведена

кривая проницаемости электротехнической стали в слабых полях, измеренная при разных температурах. Как при повышении температуры, так и при уменьшении ее наблюдается исчезновение области постоянного

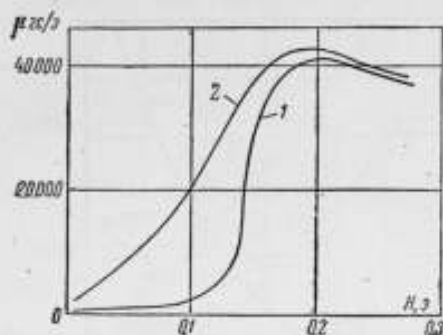


Рис. 7. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для электротехнической кремнистой стали (0,2 мм).

1 — до размагничивания; 2 — после размагничивания.

значения проницаемости или линейного изменения ее с увеличением напряженности поля. При этом изменяются условия экстраполяции и может быть получена большая погрешность не только в определении начальной проницаемости, но и ее температурного коэффициента.

В последние годы имеется тенденция избежать возникшие трудности в определении начальной проницаемости методом экстраполяции. В ряде случаев [1, 2, 3] определяют не величину начальной проницаемости, а величину ее в заданном поле или при заданной индукции; так, для сплавов с высокой проницаемостью пермаллоидного типа определяют проницаемость в поле

1 и 5 мэ (μ_1 и μ_5); для электротехнической стали — в полях 20 и 100 мэ (μ_{20} и μ_{100}). Определяют также проницаемость при заданной индукции, обычно равной 20 гс. При составлении новых методических инструкций или ГОСТ вопрос об определении параметров, характеризующих свойства магнитномягких материалов в слабых полях, должен быть рассмотрен специально. Для работы большинства аппаратов и приборов, использующих магнитномягкие материалы, не целесообразно, по-видимому, определять начальную проницаемость методом экстраполяции, так как получаемая величина при сложной зависимости проницаемости от поля не определяет поведение сплава в слабых полях.

Форма кривой $\mu(H)$ и величина начальной проницаемости существенно зависят от состояния образца перед измерением. На рис. 7 и 8

приведены кривые, полученные для кремнистой стали и сплавов 79НМ и 50Н после высокотемпературного отжига без размагничивания и после размагничивания того же образца перед измерением убывающим полем частотой 50 гц. Для магнитномягких сплавов марок 50Н, 79НМ, 79НМА,

значения проницаемости или линейного изменения ее с увеличением напряженности поля. При этом изменяются условия экстраполяции и может быть получена большая погрешность не только в определении начальной проницаемости, но и ее температурного коэффициента. В последние годы имеется тенденция избежать возникшие трудности в определении начальной проницаемости методом экстраполяции. В ряде случаев [1, 2, 3] определяют не величину начальной проницаемости, а величину ее в заданном поле или при заданной индукции; так, для сплавов с высокой проницаемостью пермаллоидного типа определяют проницаемость в поле

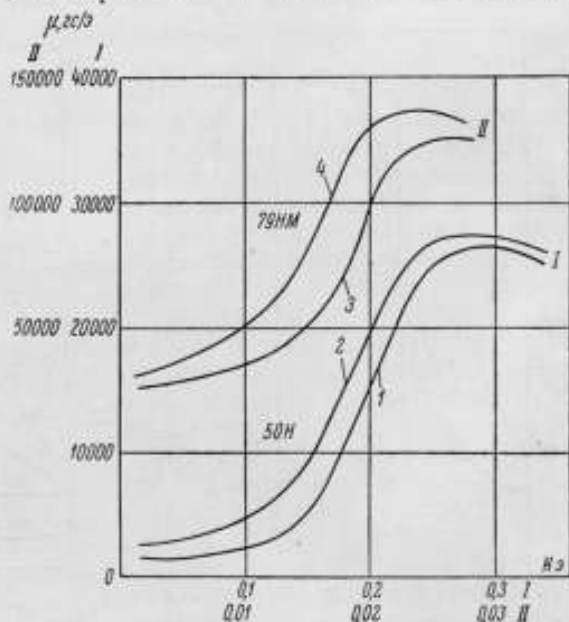


Рис. 8. Зависимость магнитной проницаемости от намагничивающего поля для сплавов 79НМ (0,1 мм) и 50Н (0,1 мм).

1, 3 — до размагничивания; 2, 4 — после размагничивания.

80НХС, 16Ю, и кремнистой стали проницаемость в первом случае, как правило, меньше, чем во втором. Изменение проницаемости после размагничивания зависит от величины намагничивающего поля, а также от химического состава и технологии изготовления сплава, толщины испытываемых лент и магнитных свойств материала. Величина магнитной проницаемости размагниченных перед измерением образцов может быть больше величины, полученной без размагничивания, на десятки и сотни процентов.

Форма кривой $\mu(H)$ и величина начальной проницаемости могут изменяться также при изменении интервала времени между окончанием размагничивания и началом измерения. На рис. 9 приведены кривые для электротехнической стали, измеренные сразу после размагничивания и через разные интервалы времени между окончанием размагничивания и началом измерения. Как видно на этом рисунке, при увеличении интервала магнитная проницаемость уменьшается.

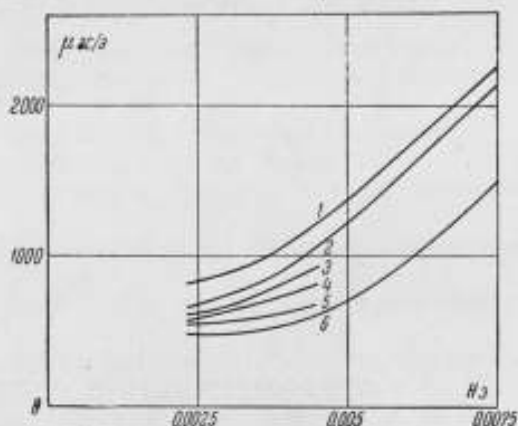


Рис. 9. Магнитная проницаемость кремнистой стали (0,35 мм) через разные интервалы времени.

1 — сразу после размагничивания; 2 — через 10 мин; 3 — через 20 мин; 4 — через 30 мин; 5 — через 1 ч; 6 — через 2 ч.

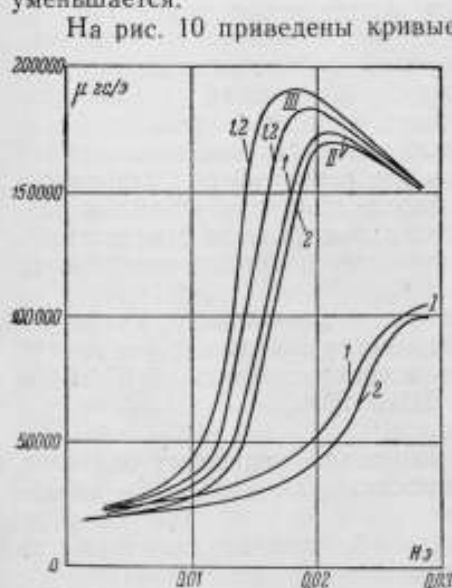


Рис. 10. Магнитная проницаемость сплава 79НМ (0,1 мм).

1 — сразу после размагничивания; 2 — через 12 ч; I при $t = -78,5^\circ\text{C}$; II при $t = 20^\circ\text{C}$; III при t выше 20°C .

На рис. 10 приведены кривые для сплава 79НМ, полученные сразу после размагничивания и через 12 ч при разных температурах. Как видно, для этого сплава наблюдается временной спад проницаемости при $-78,5^\circ$ и 20° , а при повышении температуры он не наблюдается.

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что при измерении магнитных свойств сплавов с высокой проницаемостью сопоставимые результаты могут быть получены лишь при проведении измерений в строго определенных условиях. При измерении должны быть установлены условия размагничивания, магнитной подготовки, интервал времени между окончанием размагничивания и началом измерения. При определении свойств сплавов в слабых полях необходимо оговорить правила экстраполяции кривой $\mu(H)$ на нулевое значение поля или заменить начальную проницаемость на проницаемость в заданном поле или интервале полей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бозорт Р., Ферромагнетизм, 1956.
2. Reinboth H., Technologie und anwendung magnetischer werkstoffe, 1958.
3. Deutsche Normen Elektrobleche Dynamo und Transformatorenbleche warmgewalzt (DIN), 46 400, 1954.

Г. Л. ГОРНШТЕЙН

ФЕРРОМЕТР ДЛЯ ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТ

Статья содержит описание разработанной заводом «Точэлектроприбор» установки, предназначенной для определения магнитных характеристик магнитномягких материалов в переменных магнитных полях звукового диапазона частот.

В семилетнем плане создания и освоения новых приборов заводом «Точэлектроприбор» была предусмотрена разработка феррометра для звукового диапазона частот.

Серийное производство феррометров запланировано на 1962 г.

Следует отметить, что каких-либо единых и узаконенных требований к аппаратуре для магнитных измерений на повышенных частотах не существует, поэтому мы сочли целесообразным перед началом разработки выяснить пожелания потребителей по новому прибору.

С этой целью в 1960 г. в Москве было проведено совещание, на котором обсуждались: частотный диапазон (непрерывный ряд или фиксированные частоты), вид исследуемых ферромагнетиков, форма и размеры образцов, магнитные характеристики, подлежащие определению, и пределы измерения, режимы намагничивания и методы определения магнитных величин.

В результате анализа материалов этого совещания и предварительных расчетов было разработано техническое задание на феррометр типа У5010, которое затем обсуждалось и согласовывалось с ВНИИМ и Институтом прецизионных сплавов ЦНИИЧМ.

Основные данные феррометра таковы:

1. Феррометр предназначен для испытания кольцевых образцов магнитномягких материалов при частотах 200—400—500—1000—1600—2400—3000—4800—8000—9600 гц.

Минимальные геометрические размеры образцов для минимальной рабочей частоты определяются из условия

$$(B_{\max})_{\min} \omega S > 400,$$

где $(B_{\max})_{\min}$ — минимальная величина измеряемой индукции B_{\max} ;
 ω — число витков измерительной обмотки;
 S — сечение образца.

2. Феррометр состоит из блоков: измерительного, осциллографического и питания.

3. Измерительный блок феррометра по измеренным электрическим величинам позволяет определять следующие магнитные зависимости:

$$B_{\max}(H_{\max}); B_{1\max}(H_{1\max}); \mu(B_{\max} \text{ или } H_{\max}); \rho(B_{\max}).$$

Измерительный блок позволяет измерять также указанные магнитные характеристики при подмагничивании образцов постоянным магнитным полем напряженностью до 10 а/см.

Измерительный блок включает в себя следующие элементы:

- а) калиброванные сопротивления от 0,01 до 10 ом;
- б) вольтметр действующих значений э. д. с. с пределами измерения от 10 мв до 300 в;
- в) вольтметр максимальных значений э. д. с. с пределами измерения от 10 мв до 300 в;
- г) вольтметр средних значений э. д. с. с пределами измерения от 10 мв до 300 в;
- д) ваттметр с номинальным коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,1$ и с пределами измерения от 0,1 мвт до 750 вт;
- е) амперметр магнитоэлектрической системы многопредельный;
- ж) измеритель магнитных характеристик на базе схемы уравнивания с резонансно настраиваемым нулевым прибором с пределами измерения э. д. с. первой гармоники от 1 мв до 100 в и пределом измерения $\operatorname{tg} \delta = 2$.

4. Осциллографический блок, позволяющий наблюдать одновременно две гистерезисные кривые — эталонного и испытываемого образцов, включает в себя следующие элементы:

- а) двухлучевой осциллограф с размером изображения не менее 60 мм;
- б) два усилителя вертикального отклонения (каналы *B*) с интегрирующими и фазокорректирующими цепями;
- в) усилитель горизонтального отклонения (канал *H*).

Интегрирование в усилителе осуществляется с помощью интегрирующего каскада, дающего возможность получить качественное интегрирование в рабочем диапазоне частот.

Фазовые искажения усилительного тракта не превышают 1° до частоты 50 кГц.

Интегрирование в рабочем диапазоне частот осуществляется четырьмя ступенями.

Усилители каналов *B* имеют, кроме интегрирующего каскада, три каскада усиления и два каскада с катодной нагрузкой.

Усилитель канала *H* имеет два каскада усиления и один каскад катодной нагрузки.

Коэффициент усиления канала *B* с включенными интегрирующими каскадами примерно равен 300; коэффициент усиления канала *H* — порядка 600.

5. Блок питания феррометра состоит из следующих элементов:

- а) генератора звуковой частоты типа ЗГ-10;
- б) усилительной стойки мощностью 600 вв;
- в) согласующего устройства, служащего для согласования выхода усилителя с намагничивающей обмоткой образца и регулирования намагничивающего тока;
- г) дросселя цепи постоянного тока.

Для питания цепи подмагничивания постоянным током предполагается использовать серийно выпускаемое выпрямительное устройство ВСА-5 с выпрямленным напряжением до 64 в и током до 12 а. Плавное

регулирование осуществляется автотрансформатором на переменном токе.

Для удешевления установки в комплект феррометра следует включить только измерители средних, максимальных и действующих значений э. д. с., измеритель мощности и осциллографическую часть.

Для определения же магнитных характеристик по первым гармоникам решено использовать мостовую схему на базе выпускаемой заводом установки У520 с расширенным частотным диапазоном и, комплектуя установку такой мостовой схемой, выпускать вторую разновидность феррометра.

Выпуск таких двух установок, вместо одной универсальной, целесообразнее также и потому, что мосты, требующие работников более

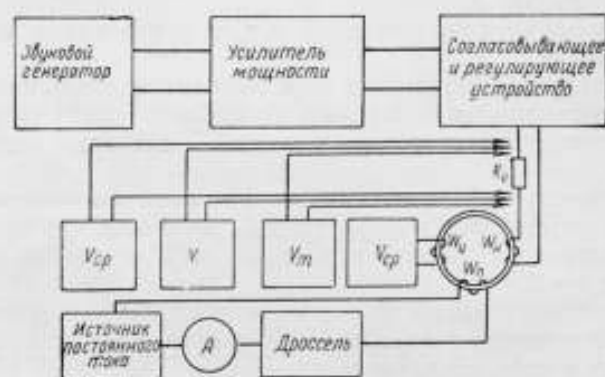


Рис. 1. Блок-схема феррометра для измерения зависимостей $B_{\max}(H_{\max})$ и $\mu(B_{\max})$ или $\mu(H_{\max})$.
 R_0 — калиброванное сопротивление; V_A — вольтметр действующих значений; $V_{ср}$ — вольтметр средних значений; V_m — импульсный вольтметр.

высокой квалификации, находят применение главным образом в научно-исследовательских институтах и отдельных лабораториях промышленных предприятий. На феррометрах же, определяющих зависимости $B_{\max}(H_{\max})$ и $\mu(B_{\max})$, могут работать лица менее квалифицированные, что позволит использовать такие феррометры значительно более широко.

Наличие осциллографической части дает возможность применить феррометр также и в цеховых условиях для разбраковки изделий из магнитномягких материалов по полю допуска.

Таким образом, феррометр типа У5010 будет выпускаться в двух исполнениях. В первом исполнении, которому посвящен настоящий доклад, в комплект поставки будет входить измерительный блок максимальных значений напряженности магнитного поля, магнитной индукции и потеря, осциллографическая часть и блок питания.

Комплект феррометра во втором исполнении будет дополнительно иметь мостовую схему, которая более детально освещается на стр. 160.

Рассмотрим более подробно феррометр У5010 в первом исполнении.

Включение феррометра для измерения зависимостей $B_{\max}(H_{\max})$ и $\mu(B_{\max})$ или H_{\max} представлено блок-схемой (рис. 1).

Как видно из этой схемы, на испытываемом образце имеются три обмотки: намагничивающая w_n , измерительная w_m и обмотка подмагничивания w_n .

Питание намагничивающей обмотки осуществляется от генератора звуковой частоты ЗГ-10 через усилитель мощности и согласующее и регулировочное устройство. В последнем для токов до 4 а используется регулируемый автотрансформатор типа ЛАТР, для токов от 4 до 40 а используется секционированная воздушная индуктивность. При этом плавная регулировка производится регуляторами выходов как звукового генератора, так и усилителя.

Измерение тока намагничивания производится по падению напряжения на безреактивных калиброванных сопротивлениях, включаемых в цепь обмотки w_n . Набор сопротивлений 0,01—0,1—1—10 ом позволяет при помощи вольтметров, входящих в комплект установки, определять напряженность магнитного поля от 10^{-3} до 10 а/см для принятых размеров образцов.

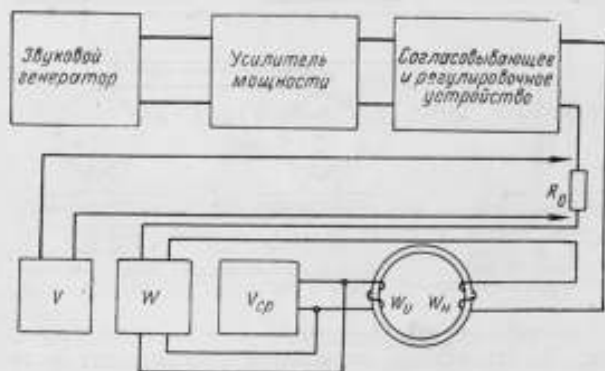


Рис. 2. Блок-схема феррометра для измерения потерь $p(B_{max})$.

В качестве вольтметров используются серийно выпускаемые нашей промышленностью вольтметр действующих значений тока КМВЛ-1 кл. 3 с пределами измерения 10 мв — 300 в и милливольтметр импульсный типа МВИ-1М (новое обозначение В4—1А) кл. 4 с пределами измерения 10 мв — 3 в с добавочным расширением пределов измерения до 300 в. Электронный вольтметр средних значений Ф517 разрабатывается СКБ завода. Этот вольтметр кл. 2,5 имеет пределы измерения от 10 мв до 300 в при постоянном входном сопротивлении 1 Мом.

Определение максимального значения напряженности поля производится по показаниям импульсного вольтметра. Вольтметры действующих и среднего значений позволяют определять коэффициент формы кривой напряженности магнитного поля; вольтметр действующих значений позволяет также контролировать величину тока намагничивания с точки зрения термоустойчивости калиброванных сопротивлений.

Вольтметр средних значений, присоединяемый к обмотке w_n , позволяет определять максимальное значение индукции в образце, коэффициент формы кривой которой может достигать 2.

Питание обмотки подмагничивания осуществляется, как указывалось выше, от источника постоянного тока через дроссель, защищающий источник постоянного тока от наведенной в обмотке w_n переменной э. д. с. и сглаживающий пульсации в цепи выпрямленного постоянного тока.

Дроссель выполнен с регулируемым воздушным зазором, рассчитан на ток до 10 а и имеет индуктивность порядка 80 гн.

Для контроля величины подмагничивающего тока служит многопредельный амперметр магнитоэлектрической системы.

На рис. 2 приведена блок-схема установки при измерении потерь $p(B_{max})$. В этом случае магнитная индукция в образце измеряется при помощи вольтметра средних значений, потери — при помощи электродинамического малокасинового ваттметра с усилителем в цепи напряжения.

Блок-схема осциллографической части установки представлена на рис. 3.

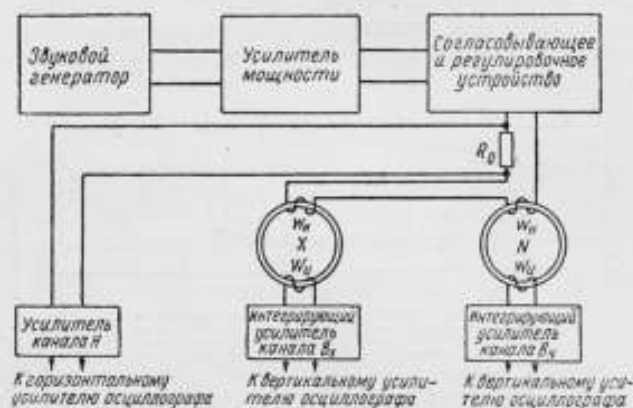


Рис. 5. Блок-схема осциллографической части установки.

В этом случае падение напряжения с сопротивления R_0 через усилитель канала N подводится к горизонтальному усилителю двухлучевого осциллографа типа ДЭСО-1. Э. д. с. от измерительных обмоток эталонного N и испытываемого X образцов через усилители каналов B_N и B_X подводится к вертикальным усилителям того же осциллографа.

Таким образом, можно наблюдать на экране осциллографа кривые гистерезисных циклов сравниваемых образцов.

В этой же схеме можно наблюдать кривые напряженности магнитного поля, потока и э. д. с. измерительных обмоток образцов при отключенных интегрирующих каскадах, а также определять динамическую проницаемость.

Для получения объективной документации кривые на экране осциллографа могут быть сфотографированы при помощи фотоприставки, входящей в комплект осциллографа.

Конструктивно феррометр типа У5010 будет оформлен в виде комплектной установки, разрешающей работать одному оператору.

В заключение следует отметить, что ряд узлов феррометра изготовлен и в настоящее время проходит испытания.

М. Э. ЛЕВИН

УСТАНОВКА ТИПА У5011 ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ В ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ ЧАСТОТАХ ДО 1000 гц

В статье дано описание установки, разработанной заводом «Точэлектроприбор» для серийного выпуска и предназначенной для измерения потерь в образцах листовых материалов ваттметровым методом в диапазоне частот 25—1000 гц.

В связи с определившейся тенденцией развития высокочастотной техники возникает необходимость создания магнитномягких материалов с малыми потерями в области повышенных частот. Естественно, что разработка новых сортов материалов совершенно немислима без соответствующей аппаратуры для магнитных измерений.

В связи с этим было целесообразно создать аппаратуру, специально предназначенную для измерения потерь в электротехнической стали в диапазоне частот от 25 до 1000 гц, не столь универсальную, как уже изготавливаемые заводом (У55, БУЗ, У542, У520, У578), а более простую, не требующую высокой квалификации оператора.

К аппаратуре такого типа и относится разработанная СКБ завода ваттметровая установка типа У5011, в которой измерение потерь производится ваттметровым методом. Установка эта успешно прошла государственные испытания в 1960 г.

Установка типа У5011 дает возможность измерять суммарные потери на перемагничивание в образцах электротехнической стали массой 10 кг в диапазоне 10—17 кгс при частотах 25, 50 и 60 гц и в образцах массой 1 кг в диапазоне индукций 7,5—10 кгс при частотах 400 и 1000 гц. Установка также позволяет производить разделение потерь, для чего необходимо произвести дополнительное измерение потерь еще на двух частотах, отличных от основной.

На установке можно определять основную кривую намагничивания полосовых образцов массой 10 и 1 кг и любых образцов кольцевой формы. В схеме предусмотрено калиброванное сопротивление в цепи намагничивающего тока, падение напряжения на котором должно измеряться пиковым вольтметром, например вольтметром МВИ-1М, не входящим в комплект установки.

По этому падению напряжения может быть определено максимальное значение тока намагничивания, а следовательно, и максимальное значение напряженности поля в образце. Максимальное значение маг-

нитной индукции в образце определяется по среднему значению э. д. с. в измерительной обмотке образца.

Погрешность измерения потерь не превышает $\pm 5\%$ при частотах 25, 50 и 60 гц и $\pm 6\%$ при частотах 400 и 1000 гц.

Установка типа У5011 включает в себя пульт управления со встроенными измерительными приборами, подставки с двумя намагничивающими аппаратами и серии стрелочных частотомеров класса 0,2, обеспечивающих точное измерение частоты на всех рабочих частотах установки.

Для определения индукции в образце, как уже указывалось выше, используется детекторный вольтметр средних значений э. д. с. типа Ц58, класса I с током потребления при полном отклонении 0,003 а.

В схеме предусмотрен также вольтметр действующих значений э. д. с. типа Д556 для определения коэффициента формы э. д. с. в измерительной обмотке образца. Вольтметр типа Д556 является прибором кл. I; его ток потребления при полном отклонении — 0,003 а.

Для измерения тока намагничивания используется амперметр типа Д555, кл. 0,5 с верхним пределом измерения 0,5 а, включаемый через специальный трансформатор тока, дающий возможность измерять ток намагничивания до 25 а.

Для определения потерь в установке используется малокосинусный ваттметр типа Д557, токовая обмотка которого включается также через специальный трансформатор тока. Ваттметр типа Д557 соответствует требованиям, предъявляемым к приборам кл. I. Номинальный коэффициент мощности ваттметра равен 0,1, номинальный ток параллельной цепи 0,005 а; номинальный ток последовательной цепи ваттметра составляет 0,5 а.

Следует отметить, что вольтметр действующих значений э. д. с. и ваттметр имеют световой отсчет.

Вольтметры и параллельная цепь ваттметра имеют пять пределов измерения: 15, 30, 75, 150 и 300 в, что обеспечивает удобство измерений при работе с образцами любых марок. Все указанные выше приборы, входящие в комплект установки, разработаны на заводе «Точэлектроприбор».

Намагничивающий аппарат для образцов массой 10 кг состоит из четырех катушек, охватывающих пакеты испытываемого образца, который укладывается в виде квадрата со средней длиной магнитной силовой линии 200 см.

Каждая катушка имеет намагничивающую и измерительную обмотки из 150 витков соответствующего провода. Идентичные обмотки всех катушек соединены последовательно, образуя намагничивающую и измерительную обмотки аппарата, состоящие из 600 витков каждая. Обмотки аппарата распределены равномерно по длине каркасов, что обеспечивает относительно равномерное намагничивание образца и измерение усредненной индукции, близкой к действительному значению.

Намагничивающий аппарат для образцов массой 1 кг также состоит из четырех катушек, охватывающих пакеты образца. Длина магнитной силовой линии этого аппарата составляет 100 см. Каждая катушка аппарата имеет намагничивающую обмотку из 75 витков и измерительную обмотку из 150 витков с отводом от 25-го витка. Таким образом, при соединении идентичных обмоток каждой катушки последовательно намагничивающая обмотка аппарата состоит из 300 витков и измерительные обмотки — из 600 и 100 витков.

Отвод от 100 витков дает возможность использовать намагничивающий аппарат при частотах ниже 400 гц.

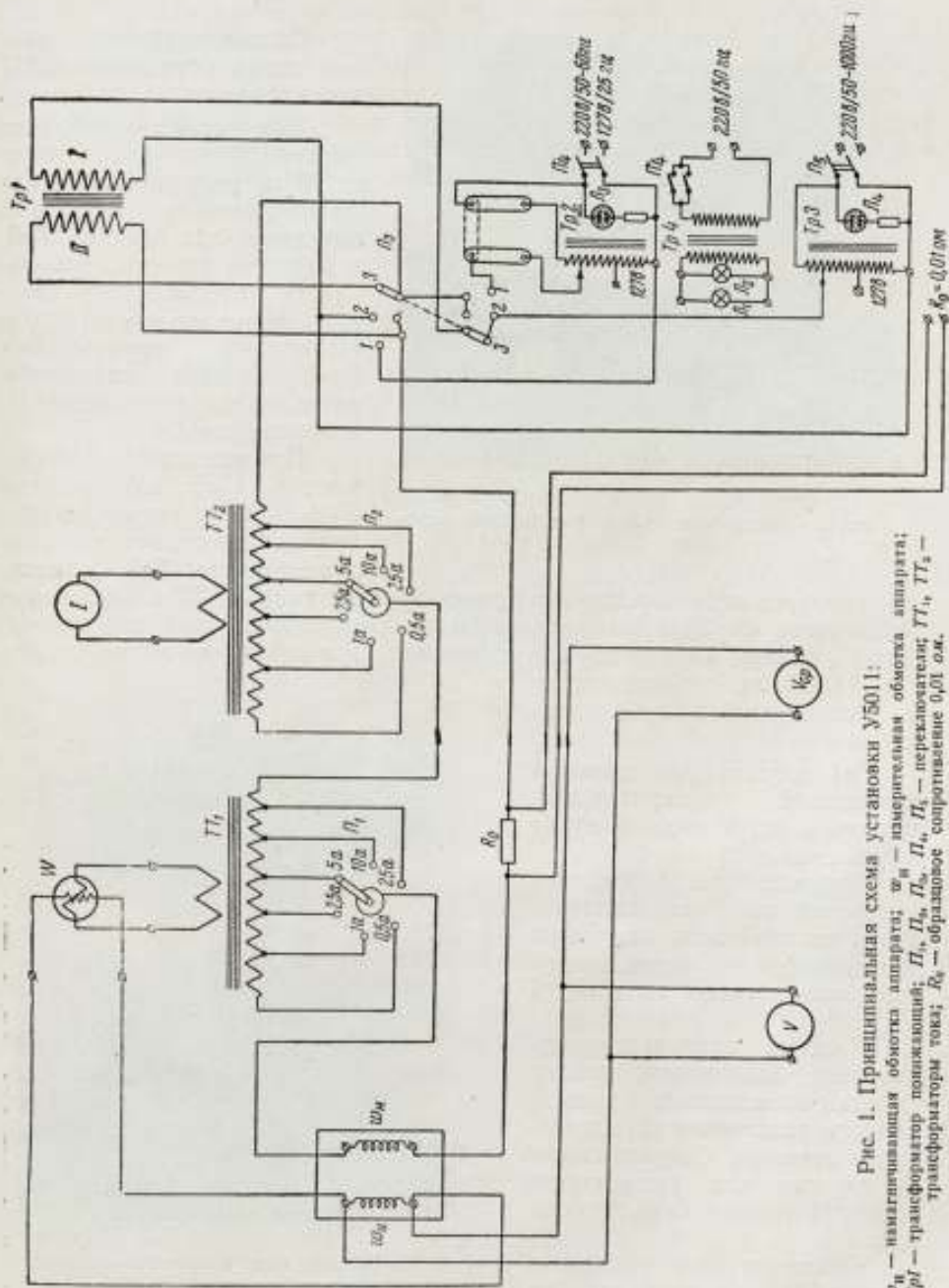


Рис. 1. Принципиальная схема установки У5011:
 w_1 — намагничивающая обмотка аппарата; w_2 — измерительная обмотка аппарата;
 $Tp1$ — трансформатор понижающий; P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 , P_6 — переключатели; $T1$, $T2$ —
 трансформатор тока; R_0 — образцовое сопротивление 0,01 Ом.

Специальные трансформаторы тока, используемые в схеме установки для расширения пределов измерения тока намагничивания и мощности потерь, выполнены в кл. 0,2 на базе трансформаторов, серийно выпускаемых заводом.



Рис. 2. Общий вид пульта управления установки У5011

в котором используется автотрансформатор типа ЛАТР-2. При испытании этого образца на частоте 50 гц схемособирающий переключатель P_3 должен находиться в положении 3. При испытании же на частоте 400 ÷ 1000 гц переключатель P_3 должен находиться в положении 2.

Tr_4 служит для питания осветителей измерительных приборов, встроенных в пульт управления.

Переключение пределов измерения тока намагничивания и токовой цепи ваттметра производится переключателями поворотного типа P_1 и P_2 .

В схеме установки предусмотрена блокировка, исключающая возможность одновременного включения двух источников питания. Сопротивление R_0 служит для определения основной кривой намагничивания.

Конструктивно установка типа У5011 рассчитана на обслуживание одним оператором и оформлена в виде комплексного устройства, состоящего из пульта, на котором размещены все приборы и рукоятки управления (рис. 2), и намагничивающих аппаратов (рис. 3).

Общая принципиальная схема установки У5011 представлена на рис. 1.

При испытании образца массой 10 кг на частотах до 60 гц регулирование намагничивающего тока производится при помощи Tr_2 , в качестве которого используется лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР-1. Испытание производится при установке схемособирающего переключателя P_3 в положение 1.

При испытании образца массой 1 кг на частотах 50 ÷ 1000 гц регулирование намагничивающего тока производится Tr_3 , в каче-

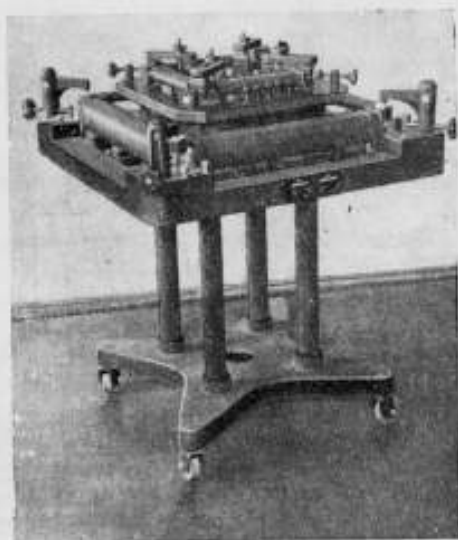


Рис. 3. Общий вид намагничивающих аппаратов установки У5011.

Оба намагничивающих аппарата смонтированы на отдельной подставке, снабженной роликами для передвижения.

Несущей конструкцией аппарата для образцов массой 10 кг является рама, отлитая из алюминиевого сплава, на которой укреплены катушки и прижимные устройства. Особенностью прижимных устройств, используемых в установке У5011, является возможность зажатия образцов в двух взаимно-перпендикулярных направлениях при вращении одной рукоятки вместо двух, применяемых в аппаратах, выпущенных раньше. Конструкция прижима обеспечивает разгрузку ходового винта прижимного устройства от значительных усилий.

Ю. А. ВДОВИН, Р. И. ЯНУС

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЛИСТОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ЖЕЛЕЗА В ПРОИЗВОДСТВЕННОМ ПОТОКЕ

В статье дан обзор методов автоматизированного контроля магнитных свойств листового электротехнического железа и описана предложенная авторами аппаратура.

Бурный рост производства и повышение требований к качеству листового электротехнического железа настоятельно требуют организации на наших заводах автоматизированного контроля качества этого материала в производственном потоке, сочетаемого с рассортировкой его на партии, достаточно однородные по качеству. В связи с этой задачей особенно интересны следующие работы.

Эдмундсон [1] описал изготовленную фирмой Томсона—Хоустона установку, производящую в минуту до 10 измерений удельных потерь P_{13} вдоль направления прокатки в целых листах электротехнического железа. Эти листы проходят через аппарат непрерывным потоком на конвейерной ленте. Установка снабжена автоматами и стабилизаторами, поддерживающими заданные значения напряжения и частоты намагничивающего тока. В измерительных цепях широко применены мощные усилители с ничтожно малыми искажениями (благодаря введению глубокой отрицательной обратной связи), в результате чего стало возможным использовать электродинамический ваттметр и другие приборы, имеющие только умеренную чувствительность, но высокую добротность. Для снижения погрешности ваттметра реактивная составляющая тока в токовой катушке ваттметра компенсируется посредством катушки взаимной индуктивности.* Чтобы избежать затраты времени на взвешивание каждого листа и на перенастройку и перерасчеты, учитывающие отклонения его толщины от номинальной, здесь применили такой способ. Имеем известные формулы

$$U = a [s(B_{\max} - H_{\max}) + SH_{\max}]; \quad W = bs(B_{\max} - H_{\max})^n, \quad (1)$$

где U — напряжение на обмотке соленоида;
 s — площадь поперечного сечения испытуемого листа;
 B_{\max} , H_{\max} — амплитуды индукции в листе и напряженности поля;

* Н. М. Рудный [10] применил для той же цели конденсатор.

- S — площадь витка соленоида;
 W — мощность, расходуемая на перемагничивание листа;
 a — известный коэффициент;
 b, n — постоянные для данной марки железа, если интервал изменений B_{\max} достаточно узок.

Пусть U поддерживается постоянным, тогда

$$(B_{\max} - H_{\max}) ds + s(dB_{\max} - dH_{\max}) + S dH_{\max} = 0. \quad (2)$$

W тоже будет постоянной, если

$$(B_{\max} - H_{\max})^n ds + ns(B_{\max} - H_{\max})^{n-1} (dB_{\max} - dH_{\max}) = 0. \quad (3)$$

Из формул (2, 3) получаем

$$\frac{dB_{\max}}{dH_{\max}} = \frac{S + s(n-1)}{s(n-1)}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что если подобрать такие значения U и S , при которых условие (4) выполняется при номинальных значениях индукции B_{\max} и толщины листа, то при испытании любых листов железа той же марки показания ваттметра будут пропорциональны P в испытуемом листе, независимо от небольшого отклонения в его толщине (так как изменение s автоматически меняет B_{\max} настолько, что W сохраняет значение, соответствующее данному материалу при s и B_{\max} , равных номинальным). Настройку установки под это условие производят экспериментально по нескольким листам железа, одинаковым по P 13, но различным по толщине; при этом подгонку S можно заменить подгонкой коэффициента взаимной индуктивности специальной катушки, включаемой последовательно с соленоидом.

Круг [2] описал выпускаемую фирмой Сименса—Гальске установку, аналогичную по назначению. В ней испытуемые листы подаются друг за другом по рольгангу сперва на автоматические весы, по показанию которых установку настраивают на вес очередного листа. Далее лист поступает в пермеаметр с наружным ярмом (служащим для повышения однородности намагничивания), подобный описанному в литературе [3], но снабженный электроприводом, автоматически раздвигающим и сжимающим его ярмо в нужные моменты времени. Присоединенные к нему ваттметр и другие приборы показывают непосредственно P , H_{\max} и H_{eff} при $B_{\max} = 10$ или 15 кгс; здесь тоже (как и повсюду в таких устройствах) использованы мощные усилители, что позволило применить приборы с высокой добротностью. На каждое измерение затрачивается около 10 сек.

Гернхарт и Ланге [4] описали установку, работающую круглосуточно на заводе «Бохум Штальверке» на контроле и рассортировке трансформаторного железа по P 10 и H 10. Испытуемые листы сперва взвешиваются, затем проходят на конвейерной ленте друг за другом под электромагнитом переменного тока, создающим в листе однородную индукцию с $B_{\max} = 10$ кгс почти по всей его длине (эта однородность достигнута за счет соответствующей формы ярма электромагнита и неравномерности распределения по его длине витков намагничивающей обмотки). Обмотки на катушках для измерения индукции и напряженности поля распределены равномерно по участку, охватывающему 85% длины листа. Основная часть намагничивающего тока берется от технической сети. Для улучшения синусоидальности потока индукции высшие гармоники э. д. с. от катушки для измерения индукции подают на вход 100-ваттного усилителя, создающего в намагничиваю-

щей обмотке дополнительный ток, уменьшающий эти гармоники (т. е. здесь используется отрицательная обратная связь). Этот прием в связи с той же задачей упоминается в литературе [5] и [6]. Время на одно испытание 6—8 сек.

В статье Р. И. Януса и др. [7] описана опытная лабораторная модель стана для автоматической рассортировки листов электротехнического железа по статической коэрцитивной силе. Позднее тем же коллективом в содружестве с Верх-Исетским металлургическим заводом была построена опытно-промышленная модель такого стана и испытана на нормальной заводской продукции. Испытания дали удовлетворительные результаты.

Следует заметить, что в имеющихся описаниях конвейерных установок совсем не затронуты вопросы о способах подачи испытуемых листов на конвейер и последующей раскладки их по сортам: по-видимому, там главными (если не единственными) исполнителями этих операций являлись не механизмы, а люди. В данном стане из стопы листов, подаваемых на тележке под приемник, пневматический заборщик захватывает один верхний лист и переносит его на конвейерную ленту; после того как он прошел испытание, в приборе для измерения коэрцитивной силы таким же способом автоматически захватывается следующий лист и т. д. Лист, вышедший из коэрцитиметра, дальше движется в подвешенном положении по нижней поверхности электромагнитного рольганга, автоматически отпускающего его над тем из стопоукладчиков (тоже автоматических), который соответствует качеству данного листа по сигналу коэрцитиметра. Таким образом, здесь оператор при нормальной работе стана управляет только заменой освободившихся тележек нагруженными под приемником стана и нагруженными — порожними под выдачными стопоукладчиками (очевидно, и эти функции можно переложить на автоматы). Наш опыт показал, что создание приемных и выдачных устройств таких станов и наладка бесперебойной автоматической их работы является технически трудной и громоздкой, но очень ответственной задачей, по сравнению с которой обеспечение удовлетворительной работы измерительного устройства такого типа, как коэрцитиметр, несравненно проще. Удовлетворительная практическая работа указанного выше варианта этих устройств в данном стане позволяет рекомендовать аналогичные варианты их (пока не будут найдены еще более подходящие) во всех автоматизированных станах, сортирующих листы электротехнического железа по какой-либо из характеристик их качества.

Статическая коэрцитивная сила H_c выделяется из всех магнитных характеристик наибольшей простотой техники измерения, поэтому выгодно принять ее в качестве сортировочной характеристики (той характеристики, по величине которой разделяет проверяемую продукцию рассортировочный стан) во всех тех случаях, когда она достаточно хорошо отображает действительный уровень качества сортируемого материала. Опыт показал, что это хорошо оправдывается на динамном и трансформаторном железе, изготовленном по прежней (обычной для недавнего прошлого) технологии, дающей мелкозернистый металл (размеры кристаллитов значительно меньше, чем толщина листа): там потери на гистерезис, почти пропорциональные H_c , являются главной частью удельных потерь. Но опыт показал также, что многие из новых методов обработки электротехнического железа (высокотемпературный отжиг в вакууме и т. п.) резко уменьшают потери на гистерезис, не уменьшая, а иногда даже увеличивая потери на вихревые токи. В материалах, прошедших такую обработку (а они сейчас становятся

преобладающими) H_c уже не отображает с необходимой точностью ни полные удельные потери, ни проницаемость в области средних и высоких индукций, также очень важную для основных областей применения электротехнического железа.

Опыты показали [8], что для холоднокатаного текстурованного трансформаторного железа (марки Э310—Э330 по ГОСТ 802—58) В 25 очень хорошо отображает уровень качества: те листы, которые удовлетворительны по В 25, почти всегда, за очень редкими исключениями, хороши и по всем другим характеристикам. Поэтому естественно попытаться принять В 25 в качестве сортировочной характеристики для этого материала. Однако измерение характеристик проницаемости, в отличие от измерения H_c , требует точного определения толщины листа, что всегда делалось по весу, например, на конвейере фирмы Сименс—Гальске перед измерением Н10 или Н15 производится точное взвешивание каждого листа. Но это неизбежно ограничивает скорость хода конвейера до величин, недостаточных для организации сплошного контроля всей продукции современного завода. К тому же сейчас быстро нарастает производство электротехнического железа в рулонах с длиной ленты порядка 1 км, где для определения толщины отдельных участков ленты весовой способ вообще неприменим. Здесь едва ли применимы (из-за малой пропускной способности) и любые из таких методов, которые, подобно механическим микрометрам, требуют плотного двухстороннего контакта с поверхностью листа или ленты.

Одним из возможных решений этой задачи является предложение, опубликованное в «Бюллетене изобретений» [9]. Оно основано на том, что поток индукции Φ_s в испытуемом листе, измеренный при достаточно сильном намагничивающем поле H_s , почти пропорционален индукции насыщения B_s железа, а поток Φ_{25} , измеренный при поле $H = 25$ ав/см, пропорционален В 25 с тем же коэффициентом пропорциональности, т. е. $B_{25}/B_s = \Phi_{25}/\Phi_s$. При переменном поле Φ_{25} и Φ_s пропорциональны э. д. с. E_{25} и E_s измерительной обмотки, поэтому прибор логометрического типа, показывающий отношение E_{25}/E_s , можно проградуировать непосредственно на В 25 с той точностью, с какой сохраняется постоянной B_s в листах контролируемой марки железа. E_{25} и E_s можно снимать одновременно и даже с одной обмотки, если перемагничивать лист при $H_{\max} = H_s$, а к измерительной обмотке присоединить параллельно две схемы, из которых одна дает на выходе средневыпрямленную величину э. д. с., другая — среднюю э. д. с. за время изменения H от $+25$ ав/см до -25 ав/см (или наоборот), используя устройства, аналогичные применяемым в феррометрах.

Мы провели предварительные испытания нескольких промышленных партий железа марок Э310—Э330 на опытном аппарате, построенном по этому принципу. Питание аппарата производили от технической сети через регулируемый автотрансформатор; H_s задавали порядка 200—250 ав/см; выделение E_{25} производили посредством моста на полупроводниках с управляющим напряжением, имеющим заранее подобранный постоянный фазовый сдвиг. Оказалось, что если держать питающее напряжение постоянным до $\pm 1\%$, то значения В 25 получаются стабильными до ± 100 гс (заметим, что интервалы по В 25 между марками Э310, Э320, Э330 по ГОСТ 802—58 составляют 500 гс). Попутно с В 25 эта же схема дает и среднюю толщину листа (вычисляемую из E_s), которую тоже полезно знать и контролировать.

По-видимому, данная схема позволит определять В 25 и в рулонной ленте при движении последней со скоростью порядка 10 м/сек (хотя при этом возникнут новые явления, еще требующие изучения).

Вероятно, что примененный здесь логометрический принцип можно будет перенести (после разработки ряда технических вопросов) и на измерение удельных потерь в движущейся рулонной ленте. Хотя контроль на удельные потери технически значительно сложнее, чем контроль на В 25 или аналогичные ей характеристики проницаемости, но он может потребоваться при контроле нетекстурованного железа (как в листах, так и в рулонах) в тех случаях, когда ни одна из характеристик проницаемости, а также H_c не могут служить главной сортировочной характеристикой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Edmundson D., Proc. Inst. Electr. Eng., Part B, v. 102, N 4, 1955, p. 427.
2. Krug W., Arch. f. d. Eisenhüttenwesen, Bd. 27, N 3, 1956, S. 193.
3. Соколов А. Д., Янус Р. И., Физика металлов и металловедение, вып. 1, № 1, 1955, стр. 110.
4. Gernhardt P., Lange H., ETZ-A, Bd. 77, N 17, 1956, S. 573; Arch. f. d. Eisenhüttenwesen, Bd. 27, N 3, 1956, S. 199.
5. Greig J., Proc. Inst. Electr. Eng., Part B, v. 102, N 4, 1955, p. 437.
6. Кутяшов В. А., Известия высших учебных заведений, «Электромеханика», вып. 1, № 4, 1958, стр. 3.
7. Янус Р. И., Кубарев В. В., Вдовин Ю. А., Колпаков И. П., «Заводская лаборатория», вып. 25, № 4, 1959, стр. 480.
8. Вдовин Ю. А., Ярошенко Ю. Н., «Вестник электропромышленности», № 1, 1961, стр. 38.
9. Янус Р. И., Вдовин Ю. А., Бюллетень изобретений, № 23, 1959.
10. Рудный Н. М., «Физика металлов и металловедение», вып. 1, № 1, 1955, стр. 105.

В. Т. ПЕЧЕНЕВ

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К КАЧЕСТВУ ХОЛОДНОКАТАНОЙ СТАЛИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ ДЛЯ МОЩНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В статье обсуждаются вопросы, относящиеся к требованиям, предъявляемым к качеству холоднокатаной стали при изготовлении мощных трансформаторов. Дается перечень характеристик этой стали, необходимых для расчета трансформаторов. Приведен краткий обзор методов и аппаратуры для исследования.

Задача создания мощных экономических трансформаторов может быть решена при наличии электротехнической стали высокого качества как по магнитным свойствам, так и по отделке поверхности.

В настоящее время для мощных трансформаторов все шире применяется холоднокатаная анизотропная сталь, которая требует не только усовершенствования технологии ее изготовления и обработки, но и изменения методов испытаний.

Качество стали и методы ее испытаний по ГОСТ. В настоящее время холоднокатаная сталь по электромагнитным свойствам и качеству поверхности еще недостаточно удовлетворяет трансформаторостроение. Удельные потери и индукция в партиях и листах неравномерны, поэтому определяемые характеристики на пробах по ГОСТ имеют большие расхождения при повторных испытаниях.

В приведенной таблице указаны характеристики нескольких партий стали толщиной 0,5 мм, определенные на сверенных установках Московского электрозавода и различных металлургических заводов. После внесения поправок разница потерь достигает величины 10—15%.

Это свидетельствует о неравномерности свойств листов в партии и несовершенстве методики отбора проб и их испытаний по ГОСТ.

Поставляемая сталь имеет большие колебания толщины, в отдельных случаях превышающие допуск и достигающие величины 0,08—0,1 мм вместо допустимых 0,04 мм (магнитогорская и липецкая сталь). Эти отклонения являются также результатом отсутствия автоматического контроля толщины при прокате и после отжига.

Такие отклонения толщины не позволяют собирать сердечники в заданный размер и ведут к ухудшению характеристик холостого хода трансформаторов.

Номера партий стали	Характеристики			Наименование заводов
	P 10, ам/кг	P 15, ам/кг	B 25, гс	
718	0,96 1,11	2,08 2,25	19 520 19 050	Липецкий завод Московский электрозавод
1167	1,00 1,08	2,23 2,20	19 380 19 200	Липецкий завод Московский электрозавод
1016	0,95 1,06	2,13 2,15	19 400 18 800	Липецкий завод Московский электрозавод
800	1,08 1,05	2,36 2,10	18 790 19 050	Липецкий завод Московский электрозавод
1135	1,02 1,10	2,30 2,40	18 300 18 400	Магнитогорский завод Московский электрозавод
8735	1,12 1,10	2,32 2,25	18 350 18 800	Новосибирский завод Московский электрозавод

На отдельных листах наблюдается повышенная волнистость, достигающая высоты до 14 мм, что является следствием несовершенства методики контроля высоты волнистости и отсутствия ее автоматического контроля на ленте и на всех листах после проката и отжига стали результаты испытаний анизотропной стали на аппаратах Эпштейна встык или встык—внахлестку не соответствуют свойствам вдоль проката; наибольшее относительное увеличение потерь и намагничивающей мощности по указанной методике на пробах наблюдается при индукции до 15 000 гс.

Для улучшения свойств стали, применяемой в мощных трансформаторах, необходимо создать автоматическую аппаратуру, обеспечивающую контроль всей продукции.

При контрольных испытаниях с целью их упрощения и автоматизации, потери и точки основной кривой намагничивания по договоренности между потребителем и поставщиком могут определяться при одном значении индукции, например: [P 17—H17] или [P 10—H 10], при условии гарантирования остальных точек по кривым, указанным в каталоге, составленном металлургическими заводами, и в ГОСТ. Так, например, в сертификатах на рулонную импортную сталь для каждого рулона весом до 2 т указываются минимальные и максимальные значения свойств в пределах марки, а остальные свойства гарантируются нормативными документами (ГОСТ и каталог).

Для расчета мощных трансформаторов в настоящее время необходимы более полные характеристики анизотропной холоднокатаной стали, которые должны быть в каталогах или справочниках заводов поставщиков.

Каталоги должны содержать следующие характеристики:

1) Кривые суммарных удельных потерь при частоте 50 гц, а также отдельно потерь на гистерезис и вихревые токи для индукций 10÷20 000 гс.

2) Основные кривые намагничивания на постоянном и переменном токе для индукций 10÷22 000 гс.

3) Петли гистерезиса, снятые на постоянном и переменном токе при индукциях до 20 000 гс.

4) Кривые магнитной проницаемости для индукций $10 \div 22\,000$ гс.
5) Кривые тангенциальной составляющей анизотропии при частотах 50 и 400 гц под углами к прокату 0, 20, 30, 45, 60 и 90° при индукции $500 \div 18\,000$ гс.

6) Кривые зависимости потерь и кривые зависимости индукции от напряженности поля при частоте $20 \div 100\,000$ гц и индукции $10 \div 15\,000$ гс.

7) Кривые магнитострикции при индукции до 18 000 гс и частоте $50 \div 400$ гц.

8) Удельное сопротивление стали.

9) Кривые старения магнитных свойств стали в процентах: при индукциях $10 \div 18\,000$ гс.

Указанные характеристики при переменном токе должны соответствовать синусоидальной форме индукции и условиям ГОСТ при проведении контрольных испытаний стали в отожженном состоянии.

Перечень указанных характеристик составлен в соответствии с требованиями расчета.

Определение полных характеристик стали по каталогу потребует разработки и применения более точных методов измерений и аппаратуры.

В настоящее время отсутствует методика определения характеристик стали при подмагничивании постоянным полем величиной $50 \div 500$ э и более, которые необходимы для расчета мощных реакторов.

Для обеспечения качественных испытаний стали необходимо в ближайшие годы на металлургических заводах создать:

1) автоматическую установку высокой производительности для контрольных испытаний холоднокатаной стали в листах и ленте с погрешностью $\pm 2\%$;

2) аппаратуру для лабораторных испытаний стали (потерь, намагничивания, анизотропии, магнитострикции и др.) с погрешностью $0,5-1\%$;

3) приспособление и приборы для автоматического измерения толщины и волнистости ленты и листов.

Необходимо также создать аппаратуру и приборы для испытаний стали с большим подмагничиванием постоянным полем (до 500 э и более) при одновременном питании переменным полем частотой 50 и 400 гц и индукциях до 22 000 гс; освоить выпуск малокосинусных ваттметров для измерений при $\cos \varphi = 0,01$, токе до 50 а и напряжении $30 \div 600$ в (без измерительных трансформаторов) и вольтметров средних и эффективных значений, с малым потреблением. Для исследований стали для трансформаторов необходимы, кроме того, измерительные установки, которые ввиду различной ширины листов могут несколько отличаться от аппаратуры, применяемой для контрольных испытаний стали на металлургических заводах.

Некоторые методы испытаний стали. Как известно, в цепи со сталью имеет место искажение формы кривой потока, обусловленное сопротивлением намагничивающей обмотки и высшими гармониками тока. Определение действительной величины потерь в стали, приведенных к синусоидальному потоку, при этом затруднительно, так как вносимые поправки (посредством коэффициента формы кривой э. д. с.) не обеспечивают необходимой точности из-за непостоянства соотношения потерь на гистерезис и вихревые токи в стали. При больших индукциях ($17\,000 \div 20\,000$ гс) и возрастании коэффициента формы кривой э. д. с. до значений 1,3—1,5 такое приведение потерь к синусоиде

дает совершенно неверные результаты. Определение же намагничивающей составляющей эффективного тока при искаженном потоке не поддается расчету. При коэффициенте формы кривой, равном 1,3—1,5, на основании опытных данных и расчета по снятым амплитудным значениям тока, ошибка в определении эффективного намагничивающего тока достигает 30—50%.

Искажение потока является основным фактором, затрудняющим получение точных результатов при испытании электротехнической стали.

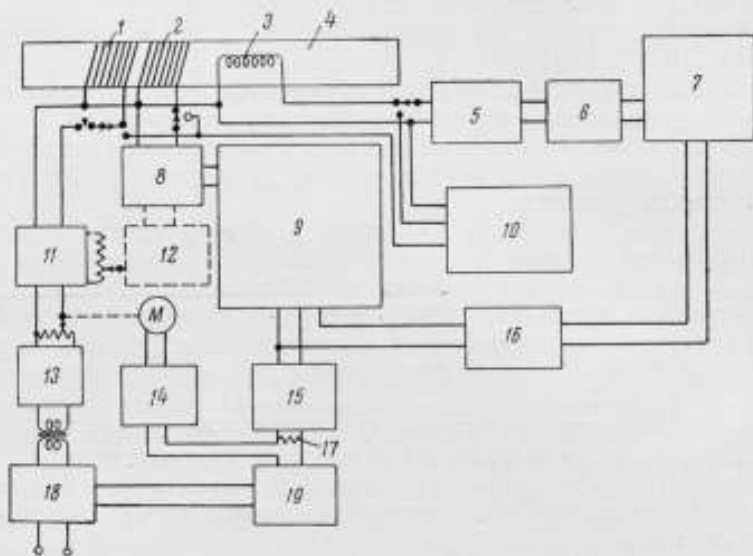


Рис. 1. Полуавтоматическая испытательная установка для определения потерь трансформаторной стали в листах:

1 — намагничивающая катушка; 2 — катушка В; 3 — катушка Н; 4 — пластина сердечника; 5 — электронный интегратор; 6 — усилитель Н; 7 — ваттметр; 8 — катушечный повторитель — разделительный усилитель; 9 — расчетное моделирующее устройство; 10 — калибровочный элемент; 11 — усилитель мощности; 12 — фильтр промышленной частоты и корректирующая сервосистема; 13 — фильтр полосы пропускания; 14 — сервоусилитель; 15 — усилитель и выпрямитель вольтметра; 16 — усилитель В; 17 — прецизионное сопротивление; 18 — стабилизатор напряжения переменного тока; 19 — известное напряжение постоянного тока.

Однако последние достижения электронной техники позволяют значительно снизить влияние искажения потока при измерении магнитных свойств стали на переменном токе и создать новую автоматическую и лабораторную аппаратуру. Заслуживают внимания некоторые новые установки этого типа, уже описанные в информационных и рекламных источниках. Одна из таких установок описана в журнале «Power Apparats and Systems», 1957, XX, № 2, p. 118. Ее принципиальная схема дана на рис. 1. Эта установка предназначена для измерений удельных потерь P_{10} и P_{15} . В описании указано, что намагничивание стали производится в секционированной катушке с незамкнутой магнитной цепью.

Для получения более точных результатов измерений необходимо, чтобы длина испытуемого участка образца была в шесть раз меньше длины намагничивающей катушки.

Регулирование величины индукции и компенсация ее формы производятся автоматически по задаваемой номинальной толщине стали.

Точность измерений потерь $\pm 2\%$. Скорость испытаний — 20 листов в минуту. Ширина испытуемых листов или ленты 76 760 мм

(испытание при указанном интервале размеров обеспечивается применением нескольких обмоток).

Основным преимуществом установки является непрерывность измерений, а недостатком — невозможность измерений свойств всего листа. Схема не предусматривает измерений толщины листа и величины амплитудного тока. Узлы для этих измерений могут быть встроены в схему дополнительно. Другая установка описана в рекламном сборнике венгерского предприятия по поставке электронизмерительного оборудования «Трансэлектро».

Принципиально ее работа аналогична работе по первой схеме. Производительность установки до 5 т/час. Погрешность измерений $\pm 3\%$. Преимуществом схемы является возможность автоматического

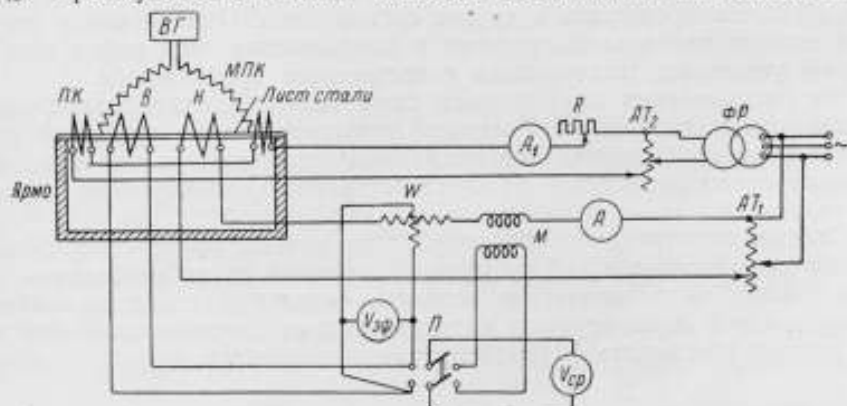


Рис. 2. Установка для определения магнитных характеристик электротехнической стали в листах:

H — намагничивающая обмотка; *B* — измерительная обмотка; *PK* — обмотки компенсации; *MPK* — магнитный пикс компенсации; *BГ* — вибрационный гальванометр (индикатор); *W* — ваттметр; *П* — переключатель; *M* — катушка взаимной индуктивности; *A*, и *A* — амперметры; *V_{эф}* — вольтметр эффективных значений; *V_{ср}* — вольтметр средних значений; *AT₁* и *AT₂* — регулировочные трансформаторы; *R* — реостат; *ФР* — фазорегулятор.

контроля не только величины потерь P_{10} и P_{15} , но и толщины листа и проницаемости. Кроме того, индукция автоматически регулируется в зависимости от колебаний толщины листа.

Как указано в описании первой схемы, при уменьшении скорости испытаний и более близком расположении катушки поля к листу имеется возможность производить на установке более точные измерения.

Необходимо отметить, что обе установки имеют ограниченный предел измерений характеристик — до индукции 15 000 гс. Для контрольных же испытаний холоднокатаной анизотропной стали, идущей для мощных трансформаторов, необходимо определять потери до 18 000 гс и напряженность (амплитудное значение) поля до 25 а/см. Испытание холоднокатаной стали на образцах внахлестку дает более близкие значения свойств стали к действительным и может быть рекомендовано для контрольных и арбитражных испытаний холоднокатаной стали. Представляет интерес устройство, предложенное В. Ф. Петровичем (рис. 2). * Эта установка после усовершенствования может быть применена лишь для лабораторных исследований листов стали. Преимуществом ее является возможность производить измерение почти на целом листе и точно определять длину и вес образца.

* Автореферат диссертации «Исследование некоторых методов магнитных измерений на низкой частоте», Киевский политехнический институт, 1958.

Принцип работы схемы заключается в компенсации намагничивающей силы внешней магнитной цепи, при этом между точками равных магнитных потенциалов листа определяются потери и намагничивающий ток.

Проведенные исследования стали на этой аппаратуре показали, что для точных измерений необходимо применять стабилизатор формы потока и катушку для измерения напряженности поля вместо катушки взаимной индуктивности. По приведенной схеме до индукции 15000 гс точность измерения потерь удовлетворительная; амплитудные же значения тока получаются завышенными.

В настоящее время разработкой установок для полистного контроля стали, как известно, занимаются Уральский филиал Академии наук, ВИЗ, Запорожсталь и другие организации. Однако ввиду отсутствия единых технических условий и координации этих работ еще не создана установка, отвечающая современным требованиям.

Из рассмотрения приведенных схем можно сделать заключение, что для усовершенствования методов испытаний стали требуется проведение серьезной работы над созданием отдельных узлов установок с привлечением институтов по приборостроению, электронике и автоматике.

Следует отметить, что при разработке новых, более совершенных методов контрольных и лабораторных испытаний стали необходимо попутно решать метрологические вопросы, связанные с обеспечением контроля новой аппаратуры и определением ее погрешностей. Эту работу должен возглавить ВНИИМ.

В. В. ДРУЖИНИН

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНЫХ ПОТЕРЬ И МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ПО ГОСТ 802—58 В ЦЕЛЫХ И ПОЛУЦЕЛЫХ ЛИСТАХ

В статье указаны преимущества измерения удельных потерь и магнитной индукции листовой электротехнической стали в целых и полуцелых листах по сравнению с испытанием в полосах Эпштейна. Делается вывод о необходимости внесения этого метода в ГОСТ в качестве основного.

Основным методом определения удельных потерь и магнитной индукции в сильных магнитных полях листовой электротехнической стали

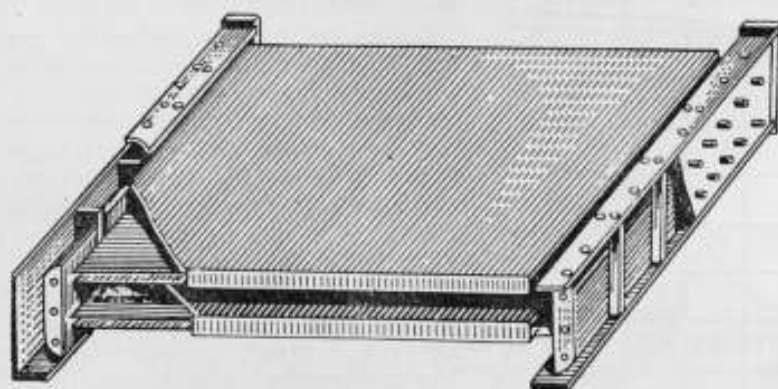


Рис. 1. Схема магнитной цепи аппарата для измерения магнитных характеристик на целых и полуцелых листах.

по ГОСТ 802—58 является дифференциальный аппарат Эпштейна—Лонкицена. Кроме того, параграфом 37 этого ГОСТ допускается определение магнитных и электрических характеристик на целых листах.

В настоящее время определение этих характеристик новым методом производится на Верх-Исетском, Лысьвенском и Северном заводах. Удельные потери определяются абсолютным ваттметровым методом, а кривая намагничивания снимается на переменном токе в координатах B_{max} и H_{max} . Намагничивающее устройство такого аппарата состоит из двух соленоидов (рис. 1). Работа этой установки подробно описана в литературе*. Четырехлетний опыт работы на такой установке показал, что при контроле горячекатаной стали, где определяются средние свой-

* Дружинин В. В., Зубов Ю. Е., Кожуров А. А. и Янус Р. И., «Вестник электропромышленности», № 7, 1958.

ства вдоль и поперек прокатки, лучшей формой являются квадратные полулисты. При этом половина их намагничивается вдоль прокатки, а вторая половина — поперек. Для холоднокатаной текстурованной стали испытание следует проводить на целых листах.

Точность определения удельных потерь и магнитной индукции получается практически такой же, как и в аппарате Эпштейна. Несколько по-другому стоит вопрос о сходимости результатов испытания удельных потерь на целых (полуцелых) листах и полосках Эпштейна ваттметровым методом. На первый взгляд должно казаться, что удельные потери, измеренные на полосках, должны быть только больше, чем на целых листах, так как при резке листов создается наклеп, ухудшающий свойства стали. Ухудшение это зависит в некоторой степени от остроты ножей и составляет по удельным потерям до 10%, а по магнитной индукции В 25 до 1,5%.

Однако в листах после отжига их в стопе из-за неоднородного охлаждения краевых и срединных частей создаются напряжения первого

Рис. 2. Появление воздушного зазора при разрезке листа на две части.

рода, которые хорошо выявляются при разрезке листа на две части. На линии реза образуется воздушный зазор, свидетельствующий о том, что эти напряжения при разрезке снимаются (рис. 2).

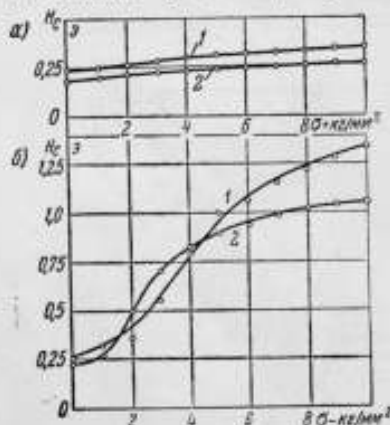


Рис. 3. Изменение коэрцитивной силы в стали Э43 под действием упругих растягивающих и сжимающих напряжений:
а — растягивающие напряжения;
б — сжимающие напряжения;
1, 2 — номера образцов.

режиме термической обработки напряжения возрастают с шириной листа. Это непосредственно сказывается прежде всего на сравнении удельных потерь в целых или полуцелых листах и полосках Эпштейна. Для горячекатаной стали различие удельных потерь в этих образцах является следующим (по средним значениям):

Ширина листа, мм	1000	750	600	500
(P полуцелые листы — P полоски Эпштейна), %	+1	-1	-3	5-

Из этих данных следует, что для листов шириной 1000 мм удельные потери в целых листах несколько больше, чем в полосках Эпштейна, а для узких листов, наоборот, несколько меньше.

Для холоднокатаной текстурованной стали шириной листа 750 мм, отжигаемой в стопах, удельные потери в целых листах и узких полосках сходятся в пределах $\pm 2\%$. Для листов, отжигаемых в проходных печах, где охлаждение краевых и срединных частей листов является более однородным, эти напряжения создаются в минимальной степени. В этом случае удельные потери в полосках Эпштейна получаются больше на 8—10%, чем в целых листах.

При рассмотрении сходимости результатов испытания по магнитной индукции в целых листах и в аппарате Эпштейна необходимо еще учитывать различие в методиках испытания, так как в аппарате Эпштейна — Лонкицена она измеряется на постоянном токе, а в аппарате, описанном в статье Дружинина и др.,* на переменном токе.

Однако для сильных магнитных полей ($H > 10$ а/см) при $f = 50$ гц кривые намагничивания на постоянном и переменном токах сходятся достаточно хорошо, что не всегда получается для области средних магнитных полей. На рис. 4 показаны кривые намагничивания стали Э330 на постоянном и переменном токах в координатах (B_{\max} и H_{\max}), из которых следует, что для измерения магнитной индукции при $H > 10$ а/см можно применять намагничивание переменным током при сохранении прежних норм стандарта.

Что касается влияния упругих напряжений на кривую намагничивания, то следует сказать, что в сильных полях ($H \geq 25$ а/см) эти напряжения практически не сказываются. В силу этого магнитная индукция B 25— B 50 на целых листах получается на 1—2% больше, чем на полосках Эпштейна, так как последние обладают наклепом.

Из листов электротехнической стали изготавливаются магнитопроводы в основном больших размеров, поэтому испытания магнитных характеристик на целых и полужелтых листах являются более объективными, чем испытания на узких полосках. К тому же при испытании по новому методу на всех заводах, производящих электротехническую сталь, будет ежегодно экономиться в нашей стране более 1000 т тонколистовой высококачественной стали.

Однако по ГОСТ 802—58 основным методом все еще является аппарат Эпштейна—Лонкицена, а те заводы, которые производят испытания на целых или полужелтых листах, должны проводить сравнительные испытания двумя методами и на основании этих сравнений вводить некоторые поправки. Следует отметить, что сравнение результатов испытания этими методами само по себе не может быть признано полностью удовлетворительным, так как связано с погрешностями ваттметрового метода, остротой ножей при резке полос, состоянием стыков и т. д.

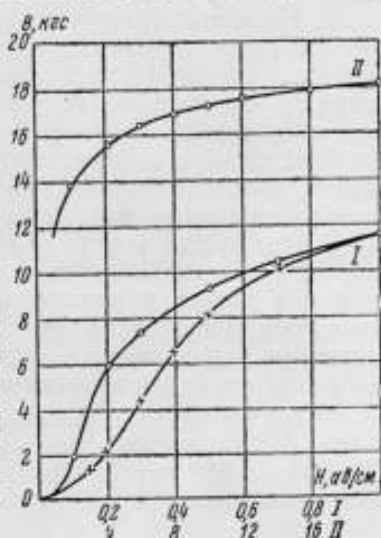


Рис. 4. Кривые намагничивания стали Э330:
о — постоянный ток; х — переменный ток ($f = 50$ гц).

* См. сноску на стр. 81.

Все это создает значительные трудности в распространении метода измерения удельных потерь на целых листах. Следует уже сейчас ставить вопрос о том, чтобы испытание на целых и полуцелых листах сделать основным методом и контроль соответствующей установки не связывать с дифференциальным аппаратом Эпштейна. В пользу такого изменения говорят еще следующие обстоятельства:

1. При изготовлении листовой стали на металлургических заводах будут в большей степени стремиться получать листы с малыми внутренними напряжениями.

2. На металлургических заводах сейчас внедряются аппараты с по листной рассортировкой по магнитным свойствам. Для того чтобы эти аппараты можно было бы применять более эффективно для рассортировки по отдельным маркам сталей, измерение магнитных характеристик по основному методу также следует проводить на целых листах.

3. Отпадает необходимость в проведении повторного отжига образцов холоднокатаной текстурованной стали, предназначенных для определения качества стали.

В заключение можно сказать, что применяемые в течение нескольких лет на Верх-Исетском и других заводах аппараты по определению удельных потерь и магнитной индукции вместо аппарата Эпштейна полностью себя оправдали, поэтому, учитывая, что метод испытания магнитных характеристик на целых листах является более объективным, чем метод испытания в аппарате Эпштейна, следует в государственном стандарте сделать его основным.

А. З. ВЕКСЛЕР

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ В СЛАБЫХ И СРЕДНИХ ПОЛЯХ

В статье приводятся результаты методических исследований при определении основной кривой намагничивания листовой электротехнической стали в слабых и средних полях. Показано, что действующий ГОСТ 802—58 нуждается в коренной переработке.

Определение кривой намагничивания электротехнической стали должно производиться в соответствии с требованиями ГОСТ 802—58, определяющего условия и методы испытаний. Согласно стандарту кри-

вая намагничивания может определяться как баллистическим методом, так и на переменном токе с помощью вольтметров, измеряющих среднее значение напряжения, причем оба способа считаются равноценными. Между тем, как показывает опыт, такая эквивалентность не всегда имеет место. Сравнительно хорошее совпадение результатов измерения на постоянном и переменном токе, когда разница не превышает 3—5%, получается при испытании горячекатаной электротехнической стали, содержащей 4% кремния при толщине листа не более 0,35 мм. Несколько худшие результаты получаются при испытании такой же стали при толщине листа 0,5 мм, но особенно сильно различаются кривые намагничивания у холоднокатаной стали толщиной 0,5 мм, у которой полосы нарезаны вдоль направления прокатки. В последнем случае различие между результатами измерения на постоянном и переменном токе может достигать до 100% (рис. 1). Как известно*, причиной

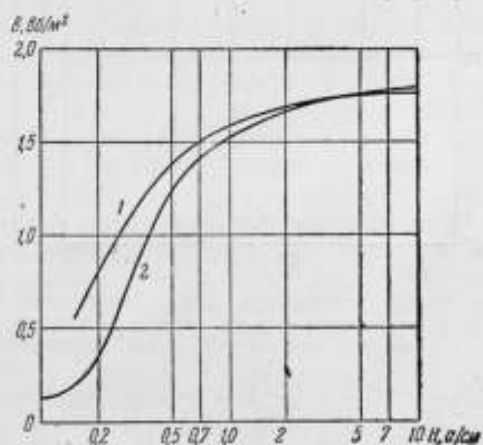


Рис. 1. Кривые намагничивания образца электротехнической стали марки Э330 при толщине листа 0,5 мм, полученные на постоянном (1) и переменном (2) токе в координатах B_{max} , H_{max} .

* Янус Р. И., Об измерениях коммутационной кривой намагничивания, Физика металлов и металловедение, т. 1, вып. 1, 1955.

расхождения результатов, полученных на постоянном и переменном токе, является действие вихревых токов, которые возрастают с увеличением толщины листа, частоты и проницаемости. Анализ этого явления показывает, что разница между значениями напряженности поля, найденными на постоянном и переменном токах, может быть приближенно оценена с помощью выражения

$$H_{\max} = H_{\text{const}} \left(1 + \frac{7}{90} \mu_{\text{диф}} \cdot \mu_{\text{ср}} \omega^2 \gamma^2 a^4 \right), \quad (1)$$

где $\mu_{\text{диф}} = \frac{dB}{dH}$ — дифференциальная проницаемость при $H = H_{\text{const}}$;

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{B}{H};$$

ω — круговая частота;

γ — удельная проводимость;

a — половина толщины листа.

Если взять данные, характеризующие разные марки стали, из ГОСТ 802—58, то нетрудно убедиться, что для холоднокатаных образцов различие между результатами измерения на постоянном и переменном токе составляет величины порядка десятков процентов, если напряженность поля значительно меньше 2 а/см. В области значений напряженности магнитного поля, больших чем 2 а/см, это расхождение получается весьма небольшим, что объясняется резким уменьшением дифференциальной проницаемости.

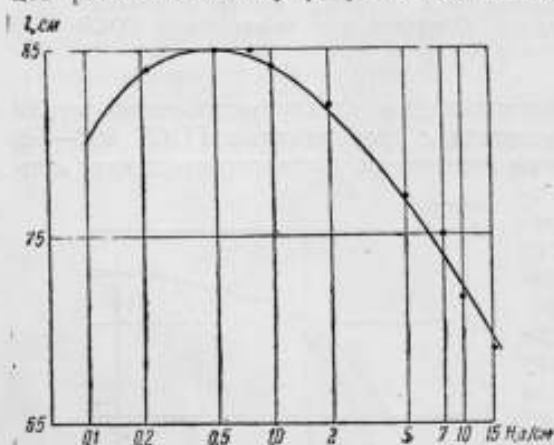


Рис. 2. Зависимость длины магнитного пути от напряженности магнитного поля для образца горячекатаной стали марки Э42.

Приведенные данные показывают, что отождествление результатов, полученных упомянутыми способами, является ошибочным. Это указывает на необходимость пересмотра соответствующих разделов стандарта.

Учитывая, что в настоящее время большое количество электротехнической стали применяется в устройствах переменного тока, целесообразно нормировать свойства стали применительно к этим условиям. Это не означает, конечно, что в качестве основной следует выбрать зависимость амплитуды индукции переменного потока от наибольшего значения напряженности магнитного поля. Более того, на определенном участке кривой намагничивания наибольший интерес для практики представляют характеристики, определяющие зависимость напряженности магнитного поля (или, в других координатах, тока холостого хода) от амплитуды индукции. Например, большой интерес представляют величины $H_{1,0}$ и $H_{1,5}$ для всех марок трансформаторной стали, так как они характеризуют ток холостого хода при общепринятых значениях индукции 1,0 вб/м² и 1,5 вб/м².

Другим важным обстоятельством, во многом определяющим правильность результатов измерения, является способ измерения напря-

женности магнитного поля. Существующий ГОСТ 802—58 предлагает проводить испытания на полосах длиной 250 мм, собранных внахлестку в малом аппарате, образующих квадрат. При этом предполагается, что длина магнитного пути равна 82 см, независимо от марки стали и напряженности магнитного поля. Между тем, как показывает опыт, длина магнитного пути, найденная по измеренным значениям напряженности поля и силы тока, не является постоянной величиной (рис. 2). Это объясняется неравномерным намагничиванием полос по длине, причем различие между напряженностью поля в середине и у концов полос составляет 30—40% при $H=10$ а/см, уменьшаясь по мере снижения поля.

Как видно из приведенного рисунка, длина магнитного пути резко изменяется в области значений напряженности магнитного поля, превышающих 0,5 а/см. Это изменение настолько велико, что при $H > 10$ а/см найденное значение длины магнитного пути оказывается меньшим, чем величина внутреннего периметра аппарата, равная 76 см. Столь малые значения измеренной длины магнитопровода объясняются неравномерным намагничиванием полос испытуемого образца стали по длине. Измеряя напряженность поля в средней части каждой из четырех катушек, мы находим наибольшее (при заданном намагничивающем токе) значение этой величины. Таким образом, длина магнитного пути вычисляется по формуле

$$l = \frac{Iw}{H_c}, \quad (2)$$

где H_c — напряженность поля в середине катушки, соответствующая выбранному значению тока I .

Расчет, в полном согласии с экспериментальными данными, показывает, что при отсутствии испытуемого образца напряженность поля в середине приблизительно в два раза больше, чем у ее краев. Если в аппарат закладывается испытуемый образец, то изменение напряженности магнитного поля по длине намагничивающих катушек резко снижается. Практически при $H \leq 0,1$ а/см можно считать, что испытуемый образец намагничивается однородно везде, за исключением стыковой части. В этой области значений напряженности магнитного поля изменение длины магнитного пути будет определяться в основном неравномерным намагничиванием стыковых областей. Это изменение сравнительно невелико, порядка 3—5 см, однако его необходимо учитывать, так как оно составляет несколько процентов от полной длины. При значениях напряженности поля, больших 1 а/см, намагничивание образца по длине уже нельзя считать однородным. Так, при $H=10$ а/см разница между значениями напряженности магнитного поля в середине и у краев катушек составляет десятки процентов. Это обстоятельство указывает на резкую неоднородность намагничивания в средних полях. Следует отметить, что в последнем случае область, где напряженность магнитного поля можно считать неизменной, оказывается весьма малой (около 2—3 см для каждой из четырех катушек), поэтому применение измерительных обмоток большей длины приводит к большим погрешностям измерения.

В связи с этим целесообразно поставить вопрос о правильном выборе величины l_0 длины магнитного пути, которое вносило бы минимальную погрешность в заданном интервале значений напряженности поля. Очевидно, что, заменяя действительное значение длины величиной l_0 , мы вносим определенную погрешность при определении

напряженности поля, которая, в свою очередь, приводит к дополнительной неточности определения индукции. Как известно, последняя погрешность может быть связана с относительным изменением $\frac{\Delta H}{H}$ следующим образом:

$$\frac{\Delta B}{B} = q \frac{\Delta H}{H}, \quad (3)$$

где

$$q = \frac{P_{\text{анф}}}{P_{\text{ср}}}.$$

Если потребовать, чтобы сумма $\sum_{n=1}^k \left(\frac{\Delta B_n}{B_n}\right)^2$, где k — число точек кривой намагничивания, для которых подбирается величина I_0 , была бы минимальной, то нетрудно получить обычным методом следующий результат:

$$I_0 = \frac{\sum_{n=1}^k l_n q_n^2}{\sum_{n=1}^k q_n^2}, \quad (4)$$

где l_n — действительное значение длины \bar{l}_n при $H = H_n$.

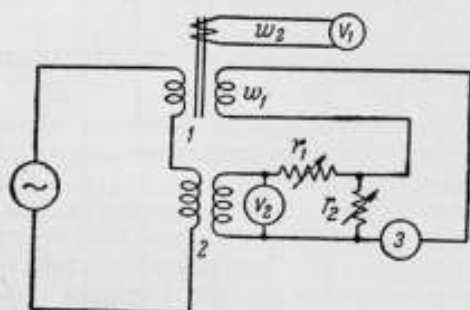


Рис. 3. Схема установки для определения кривых намагничивания и длины магнитного пути:

1 — намагничивающее устройство; 2 — катушка взаимной индуктивности; 3 — индикатор.

Расчет показывает, что для разных марок стали величина I_0 не остается постоянной, причем даже при таком способе ее подбора для всего диапазона значений напряженности поля ($0,002 \div \div 10$ а/см) получаются значительные погрешности определения индукции для отдельных точек кривой намагничивания, достигающие до $5 \div 8\%$. Поэтому целесообразно разбить хотя бы на две области весь диапазон значений напряженности поля (скажем, $0,002 \div 0,5$ а/см и $0,5 \div \div 10$ а/см) и для каждой из них найти оптимальную величину I_0 .

В этом случае погрешность может быть снижена до 3% , что в ряде случаев является вполне достаточным.

Определение длины l_n производилось с помощью установки, схема которой приведена на рис. 3. В качестве индикаторного прибора при измерениях на постоянном токе может быть использован баллистический гальванометр, а на переменном — вибрационный. При выбранных обозначениях величина l_n определяется следующим образом:

$$l_n = \frac{r_1 + r_2}{r_1} \frac{\mu_0 w_1 K_H}{M}, \quad (5)$$

где K_H — постоянная катушки для определения напряженности поля.

С помощью такого устройства можно определять кривые намагничивания в соответствующих координатах. Так, для определения на переменном токе зависимости $B_{\text{max}} = f(H_{\text{max}})$ это устройство следует дополнить вольтметрами с выпрямителями, подключенными ко вторичной

обмотке катушки взаимной индуктивности и измерительной обмотке аппарата. Благодаря тому, что имеется возможность определить длину l_a , легко найти напряженность поля в средних частях намагничивающих катушек аппарата.

При определении кривой в координатах $(B_{\text{мах}}, H_{\text{эф}})$ достаточно дополнить схему амперметром, включаемым последовательно с намагничивающей обмоткой аппарата.

Таким образом, если придерживаться в стандарте требования о нормировании длины магнитного пути, то следовало бы взамен одной величины привести таблицу, определяющую ее для разных марок стали и отдельных интервалов значений напряженности поля.

Следует отметить, что испытания в аппарате для десятикилограммовых образцов, проведенные на пробах с длиной полос 530 мм, дали несравненно лучшие результаты, чем в стандартном. В этих условиях определение напряженности поля по длине l_0 , найденной из формулы (4), приводило к дополнительной погрешности $\frac{\Delta B}{B}$, не превышающей 2%, если и не производить разделения всей области значений H на отдельные интервалы. Это объясняется более благоприятными условиями намагничивания в аппарате, имеющем значительные области с практически неизменной напряженностью поля.

Приведенные данные показывают, что действующий стандарт на листовую электротехническую сталь нуждается в коренной переработке разделов, определяющих методы и аппаратуру для магнитных испытаний.

ФОТОКОМПЕНСАЦИОННЫЙ МИКРОВОЛЬТАМПЕРВЕБЕРМЕТР Ф18

Статья содержит описание фотокомпенсационного микровольтампервеберметра типа Ф18, разработанного заводом «Вибратор» для серийного выпуска. Пределы измерения прибора (по магнитному потоку) 15—75—300 мквб, погрешности соответственно 4—1,5%.

Измерения магнитного потока флюксметром лежат в основе ряда методов магнитных измерений. По сравнению с баллистическим гальванометром флюксметр обладает рядом несомненных преимуществ: независимостью результатов измерения в широких пределах от сопротивления измерительной цепи, отсутствием предварительной градуировки, возможностью регистрации монотонных изменений магнитного потока. Однако постоянная магнитоэлектрических флюксметров обычно не превышает 5—10 мквб/дел (прибор М199 завода «Вибратор», флюксметр фирмы «Норма» Австрия) при сползании на одно деление за 3—10 сек, что часто является неудовлетворительным.

Повышения чувствительности и уменьшения сползания указателя выходного прибора можно достичь, используя схему фотокомпенсационного флюксметра [1, 2]. В последние годы в ряде иностранных изданий появились сведения о разработке фотокомпенсационных флюксметров [3, 4]. Сведений о промышленном выпуске приборов не имеется.

В 1959—1961 гг. на заводе «Вибратор» разработан и серийно выпускается фотокомпенсационный микровольтампервеберметр Ф18, общий вид которого приведен на рис. 1.

Упрощенная принципиальная схема прибора изображена на рис. 2. При использовании прибора как микровеберметра, в нем, как и в обычном флюксметре, интегрируется э. д. с. e_x , наводимая в измерительной катушке ИК при изменении магнитного потока Φ_x . Чувствительным элементом прибора является магнитоэлектрический гальванометр Г на растяжках.

В качестве усилителя используется фотоэлектрооптический усилитель на сернисто-кадмиевых фотосопротивлениях ФС1 и ФС2. Последующее усиление сигнала постоянного потока осуществляется с помощью усилителя на электронной лампе ЭЛ.

Отрицательная обратная связь по производной выходного тока, обеспечивающая высокие качества прибора, производится через конден-

сатор C_1 , так что выходной ток I , измеряемый обычным миллиамперметром, пропорционален измеряемому магнитному потоку Φ_x :

$$\Phi_x = I r_1 r_2 C_1.$$

Сопротивления r_3 , r_4 и конденсатор C_2 служат для повышения динамической устойчивости схемы.

Прибор обладает тремя пределами измерения 15—75—300 мквб (шкала прибора — 75 дел).

Основная погрешность и «сползание» указателя при измерении магнитного потока указаны в таблице. При этом сопротивление измерительной катушки не должно превышать 100 ом.

В отличие от обычных флюксометров в приборе применена полуавтоматическая схема установки нуля. Перед каждым измерением маг-

Предел измерения, мквб	Погрешность в процентах длины шкалы выходного прибора	Время сползания указателя, сек/дел (не менее)
15	4	5
75	2,5	15
300	1,5	30



Рис. 1. Внешний вид прибора.

нитного потока указатель выходного прибора может быть возвращен на нуль простым поворотом переключателя.

Как измеритель магнитного потока, прибор может иметь самые разнообразные применения. Совместно с двухкоординатным самописцем и устройством для программного регулирования тока намагничивания, микроберметр позволяет осуществить запись петли гистерезиса малых образцов магнитномягких материалов.

При измерении магнитного потока прибор не нуждается в какой-либо амортизации и может работать на обычном столе. Однако при измерении малых магнитных потоков (особенно при значительных разме-

рах образца) следует иметь в виду возможную погрешность измерения из-за магнитных помех в измерительном контуре.

Существенную погрешность могут внести также т.э.д.с. в измерительной цепи. Для их уменьшения концы от измерительной катушки к прибору должны быть выполнены нелуженым медным проводом. При этом желательно избегать резких изменений температуры среды, окружающей измерительную цепь.

В приборе предусмотрена компенсация остатка т.э.д.с. с помощью реостатов «грубо» и «точно».

Помимо пределов измерения по магнитному потоку прибор имеет пределы измерения по напряжению 1,5—3—7,5—15—30—75 мкв и по

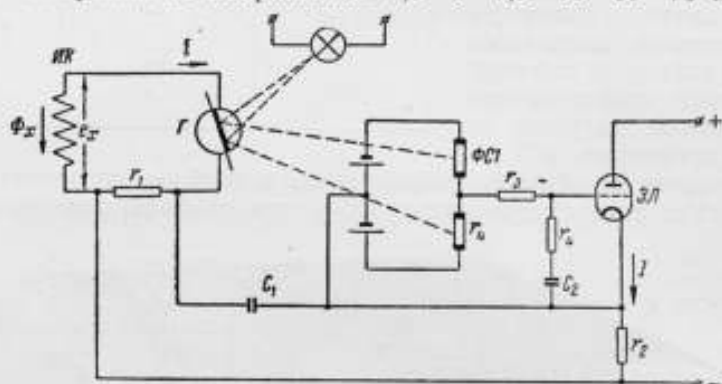


Рис. 2. Упрощенная принципиальная схема прибора.

току 0,015—0,03—0,075—0,15—0,3—0,75 мка. Для этого конденсатор C_1 в схеме (рис. 2) шунтируется накоротко и осуществляется отрицательная обратная связь по напряжению.

Питание прибора производится от сети 220 в (+5—15%) частотой 50 гц. Габаритные размеры 225×265×285 мм. Вес 10 кг.

Приведенные данные показывают, что микровольтампервеберметр Ф18, превосходя по чувствительности к магнитному потоку обычные баллистические гальванометры, отличается значительными удобствами в работе и может быть с успехом применен как в лабораторной практике, так и в заводских условиях. В настоящее время представляется возможной разработка нового флюксметра с еще более высокой чувствительностью и временем сползания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабинович С. Г., Ткаченко А. Н., «Измерительная техника», № 5, 1959.
2. Гутовский И. Г., «Автоматика и телемеханика», XXI, № 10, 1960.
3. Blockman F. Y., Stepeck W. G., Philips Techn. Rev., 16, N 3, 1954.
4. Bockmuehl R. R., Wood P. W., «Electronics», 33, N 13, 1960.

Н. С. БАБЕНКО, П. П. ТАЛКО-ГРИНЦЕВИЧ,
Н. Л. ЯЦЫНИНА

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАЛЫХ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В статье дано описание аппаратуры, предназначенной для автоматической записи статических петель гистерезиса тороидальных образцов магнитно-мягких материалов с малой площадью поперечного сечения. Постоянная аппаратуры с фотоэлектрическим флюксометром составляет 1—2 мкс/дел, погрешность измерений 1,5—2%. При записи характеристик на диаграммную ленту погрешность возрастает до 5%.

Для автоматической записи статических петель гистерезиса и кривой первоначального намагничивания образцов замкнутой формы с малым потокоцеплением (100 мксвит и выше) с погрешностью 5% рацио-

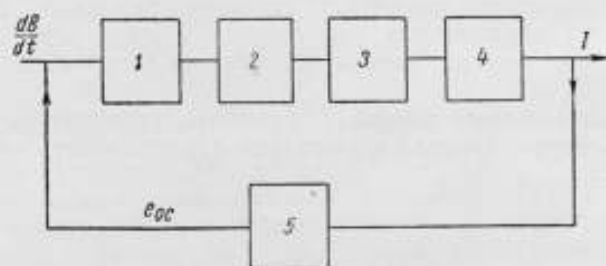


Рис. 1. Структурная схема ФЭФ;

1 — гальванометр; 2 — фотооптический преобразователь (фотоэлементный мост); 3 — входная цепь электронного усилителя; 4 — электронный усилитель; 5 — цепь дифференциальной обратной связи.

нальным является применение фотоэлектрического флюксометра ФЭФ (рис. 1) высокой чувствительности и точности, обладающего большой постоянной сползания [1—7].

Принципиально чувствительность флюксометра можно повышать неограниченно при бесконечной постоянной интегрирования, но практически высокая восприимчивость к помехам гальванометра, определяющая восприимчивость к помехам всей системы, ставит предел росту чувствительности.

Проведем оценку отношения помехи к сигналу на выходе ФЭФ. Пусть дан идеальный интегрирующий усилитель с глубокой отрицательной обратной связью (которым, по сути дела, является флюксометр без измерительной катушки) с передаточной функцией [5]

$$\frac{I(p)}{e(p)} = \frac{1}{K_{o.c} p}, \quad (1)$$

где $e(p)$ — напряжение на выходе сигнала;

$I(p)$ — ток на выходе усилителя;

$K_{o.c}$ — коэффициент отрицательной обратной связи;

p — оператор дифференцирования.

$e(p)$ является суммой напряжений полезного сигнала $u(p)$ и помехи $u'(p)$. Тогда на выходе, согласно формуле (1),

$$I(p) = u(p) \frac{1}{K_{o.c} p} + u'(p) \frac{1}{K_{o.c} p}.$$

Переходя от изображенных функций к их оригиналам, получим оценку допустимой погрешности в виде неравенства

$$\delta(t) \geq \frac{\int_0^{t_2} u'(t) dt}{\int_0^{t_2} u(t) dt}, \quad (2)$$

где t_2 — длительность эксперимента.

Из формулы (2) следует, что погрешность измерений существенно зависит от длительности эксперимента и от характера помехи. Условимся оценивать погрешность, вносимую помехой, по отношению к максимальному значению интеграла полезного сигнала. При анализе выражения (2) ограничимся рассмотрением двух случаев: 1) период сигнала больше периода помехи; 2) период сигнала меньше периода помехи.

Рассмотрим первый случай. Ограничив длительность эксперимента периодом полезного сигнала и учитывая периодичность помехи, можем написать

$$\delta(T) \geq \frac{\int_0^{T'} u'(t) dt}{\int_0^T u(t) dt},$$

где T — период сигнала;

T' — период помехи;

$T' = T - nT'$, (n — целое положительное число, удовлетворяющее условию $n \leq \frac{T}{T'}$).

Как видим, абсолютная величина высокочастотной (по сравнению с сигналом) помехи на выходе не может превосходить величины

$$\int_0^T u(t) dt.$$

Итак, для высокочастотных помех получим следующую оценку максимальной погрешности:

$$\delta \gg \frac{\int_0^T u'(t) dt}{\int_0^T u(t) dt} \quad (3)$$

В частности, если помеха и сигнал представляют собой прямоугольные импульсы длительностью τ' и τ соответственно, то получим следующую оценку для их амплитуд:

$$\frac{u_0'}{u_0} \frac{\tau'}{\tau} \ll \delta. \quad (4)$$

Обратимся к рассмотрению низкочастотных помех. В этом случае без дополнительных предположений анализ выражения (2) затруднителен. Пусть помеха имеет характер прямоугольных импульсов длительностью $\tau' \approx T$, период помехи $T' \gg T$ периода сигнала. Итак, соотношение (2) переписывается в таком виде:

$$\delta(T) \gg \frac{u_0' T}{\int_0^T u(t) dt} \quad (5)$$

Соотношения (3)–(5) показывают, что наиболее опасны для интегратора низкочастотные помехи большой длительности.

Мы не рассматривали действие на интегратор постоянной составляющей помех, поскольку всякий прибор ФЭФ интегрирует только в течение времени постоянной сползания, и всякое постоянное воздействие, в конце концов, приведет к установлению стационарного режима, т. е. это воздействие поддается компенсации с помощью специальных батарей или механического корректора.

Из формулы (5) можно получить величину наибольшей чувствительности ФЭФ, заменив $u(t)$ на $\frac{d\Phi}{dt}$, где Φ — магнитный поток через измерительную катушку ФЭФ.

После несложных преобразований получаем $u_0' T \leq \delta \Delta\Phi$. Длительность эксперимента, равная периоду изменения сигнала, определяется инерционностью записывающих приборов и, как правило, не может быть сделана менее 100 сек.

Считая $\delta = 0,01$, получим $u_0' \leq 10^{-4} \Delta\Phi$.

Если шкала выходного прибора имеет 100 делений, то

$$10^{-10} u_0 \leq C_{\Phi}, \quad (6)$$

где C_{Φ} — постоянная флюксметра, мкс/дел.

В литературе нижний предел шумов гальванометра оценивается как 10^{-9} в. Следовательно, не имеет смысла повышать чувствительность ФЭФ более чем до 10 мкс/дел при длительности цикла более 100 сек.

Фотоэлектрические флюксметры характеризуются определенной постоянной сползания, которая определяет запоминающие свойства схемы, что играет основную роль при записи кривых гистерезиса.

Длительность эксперимента (периода сигнала) и постоянная сползания θ должны удовлетворять неравенству

$$\delta \geq \frac{T}{\theta}. \quad (7)$$

Большое значение постоянной сползания во флюксметре первого рода [2, 5] достигается за счет большого коэффициента преобразования системы фотоэлектрический—электронный усилитель [5]. Во флюксметре второго рода это обеспечивается подбором постоянной времени входа электронного усилителя по условию (7)

$$\tau = \frac{P}{W_m}, \quad (8)$$

где P — коэффициент успокоения гальванометра,
 W_m — удельный противодействующий момент.

Согласно формуле [5], постоянная интегрирования ФЭФ первого рода дается выражением

$$\frac{P + K_{o.c} K_p}{W_m} = \theta, \quad (9)$$

где K_p — статический коэффициент преобразования разомкнутой системы.

Сравним параметры двух типов ФЭФ, предназначенных для измерений магнитных потоков до 1000 мкс, в течение 100 сек с погрешностью 1%.

Для обоих типов [6] $C_\Phi = 10$ мкс/дел. Отсюда, согласно общей теории [5, 7], $K_{o.c} = 10^{-2}$ вб/а. Рассчитывая K_p по формулам (7) и (9), получаем при использовании гальванометра Ф-17/1, $K_p = 10^{-1}$ нм/ом, т. е. крутизна электронного усилителя, подсчитанная согласно [5], $S = 1$ а/в.

Передаточная функция ФЭФ второго рода имеет вид

$$\frac{I(p)}{\Phi(p)} = \frac{K_p(1 + \tau p)}{C(Jp^2 + P_p + W_m) + K_p K_{o.c}(1 + \tau p)},$$

где C — емкость конденсатора на входе электронного усилителя,
 J — момент инерции рамки гальванометра.

Выполнив условие (8), после несложных преобразований получаем простую оценку для K_p

$$K_p - K_{o.c} \gg W_m C.$$

Обычно $C \approx 10^{-6}$ ф, $W_m = 10^{-7}$ нм/рад, тогда $K_p \gg 10^{-11}$ нм/ом, отсюда $S = 10^{-10}$ а/в, при постоянной входа $\tau = 10$ сек.

Сравнивая соответствующие параметры двух типов ФЭФ, необходимо признать более легкое достижение необходимой чувствительности и постоянной сползания при одинаковой помехоустойчивости с помощью ФЭФ второго рода.

Это иллюстрируется рис. 2, где приведена запись скачка магнитного потока. В течение первых пяти минут флюксметр с параметрами $K_{o.c} = 10^{-3}$ вб/а, $\tau = 5$ сек, $S = 0,04$ а/в работал в режиме ФЭФ второго рода, затем закорачиванием входной емкости прибор был переведен в режим ФЭФ первого рода. Как видим, постоянная сползания, равная в первом случае практически бесконечности, во втором случае уменьшается до 90 сек.

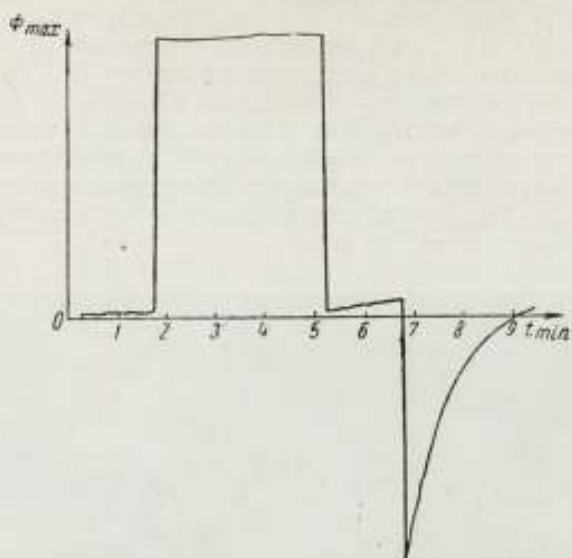


Рис. 2. Запись скачка магнитного потока.

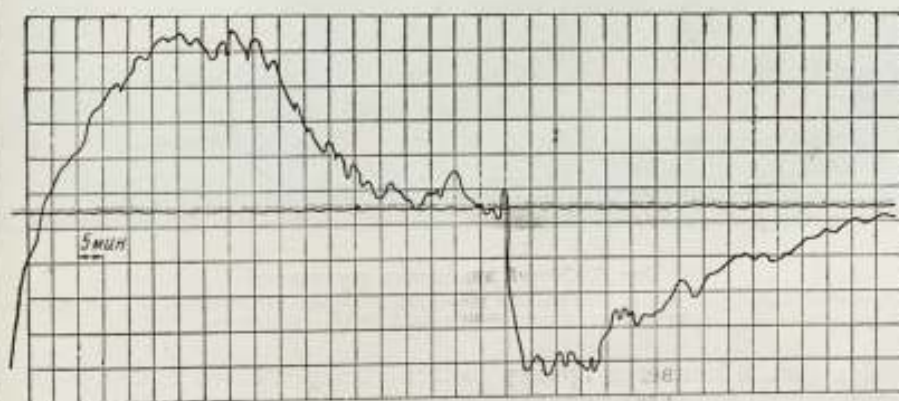


Рис. 3. Запись помех.

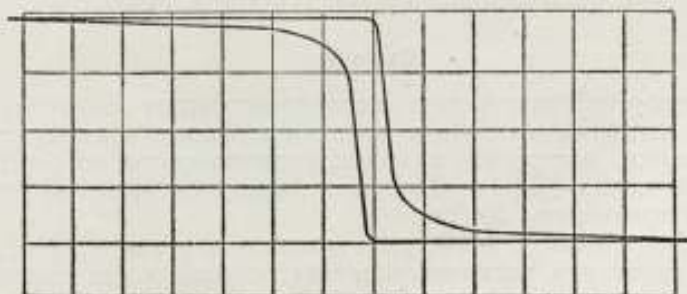


Рис. 4. Запись гистерезисного цикла образца с прямоугольной петлей гистерезиса.

На рис. 3 представлены помехи на выходе ФЭФ, записанные потенциометром ЭПП-09. Из этих записей следует, что наибольшая частота помех составляет 0,003 гц, низшая частота — порядка 10^{-4} гц. Уровень этих помех, пересчитанный ко входу, составляет от 10^{-8} до 10^{-7} в, т. е. подтверждается справедливость соотношений (3) — (5).

Так как требуемая постоянная флюксметра для измерений потоков менее 200 мкс составляет 1—2 мкс/дел, то приходится, согласно (5), ограничить время цикла тридцатью секундами, при этом погрешность составит 1,5—2%. При записи на диаграммную ленту суммарная погрешность увеличивается до 5%.

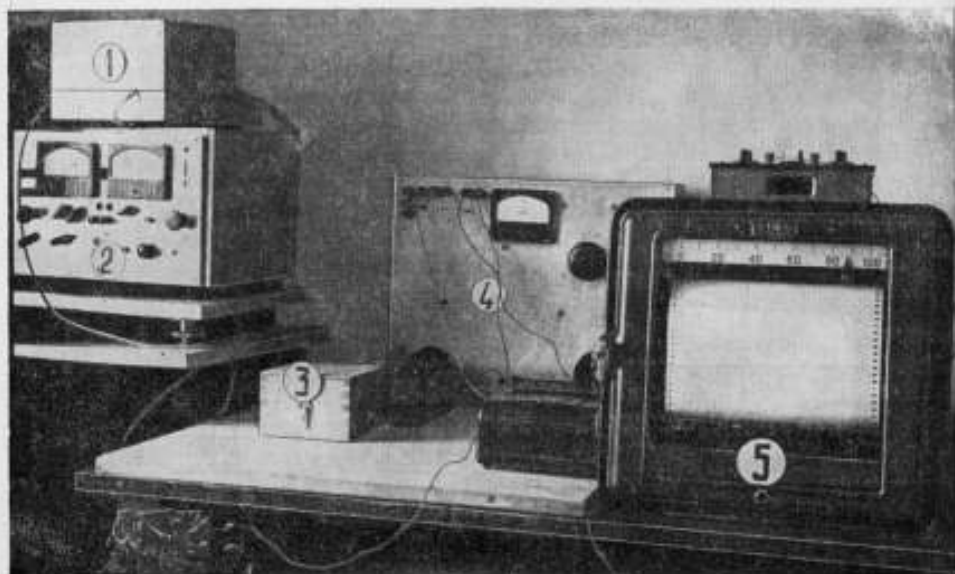


Рис. 5. Общий вид макета установки:

1 — блок гальванометра; 2 — блок электронного усилителя; 3 — стенд для образцов; 4 — регулирующее устройство намагничивающего тока; 5 — ВН — самописец.

На рис. 4 приведен пример записи гистерезисного цикла образца с прямоугольной петлей гистерезиса.

Технике измерений легко обучается даже неопытный оператор. Наибольшая трудность состоит в настройке нуля ФЭФ.

Фотография общего вида макета установки приведена на рис. 5.

Выводы

1. Помехоустойчивость двух типов флюксметров одинакова и ограничивается восприимчивостью к помехам идеального интегратора.

2. Возможно построение прибора, удовлетворительно работающего ниже уровня помех ($C_{\Phi} = 1-2$ мкс/дел), при этом время эксперимента не должно превышать 30 сек.

3. Чувствительность ФЭФ, работающего в режиме измерения однократных изменений магнитного потока (случай, когда кривая гистерезисного цикла снимается по точкам), может быть доведена до долей максвелла на деление.

4. Поскольку время циклов перемангничивания оказывается ограниченным несколькими десятками секунд, необходимо при испытаниях

различных материалов как-то оценивать влияние времени промагничивания, вихревых токов и пр.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cioffi P. P., „Rev. Sci. Instr.“ 21, N 7, 1950.
2. Гутовский И. Г., ДАН, 116, № 2, 1957.
3. Berge P. I., Guderjahn C. A., „Electronics“, 27, N 7, 1954.
4. Капица С. П., ЖТФ, XXV, вып. 7, 1955.
5. Рабинович С. Г., Ткаченко А. И., «Измерительная техника», № 5, 1959.
6. Meyer und Moerder, Spiegelgalvanometer und Lichtzeigerinstrumente, Leipzig, 1957.
7. Гутовский И. Г., «Измерительная техника», № 1, 1960.

ЭЛЕКТРОННЫЙ БАЛЛИСТИЧЕСКИЙ ГАЛЬВАНОМЕТР

Статья посвящена описанию электронного прибора, предназначенного для измерения постоянного магнитного потока.

В современной практике электрических и магнитных измерений гальванометры используются главным образом при точных лабораторных измерениях. Для измерения количества электричества и магнитного потока, в основном, нашли применение баллистические гальванометры. При работе с зеркальным гальванометром большое значение имеет предохранение прибора от механических сотрясений. Обычно их устанавливают на solidных металлических кронштейнах, вделанных в ка-

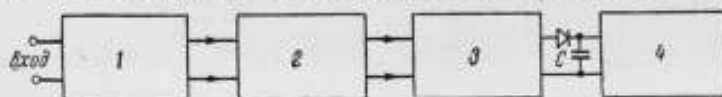


Рис. 1. Блок-схема электронного баллистического гальванометра.

питальные стены. Применение баллистического гальванометра возможно только в условиях специально оборудованной лаборатории.

Для измерения магнитного потока большое распространение получил и веберметр, который представляет собой переносной стрелочный прибор магнитоэлектрической системы с непосредственным отсчетом. Однако он имеет меньшую чувствительность, чем баллистический гальванометр. В связи с производством магнитов малых размеров, а также в некоторых других случаях появилась потребность в приборах, имеющих большую чувствительность, чем веберметр. Создание прибора, имеющего примерно такую же чувствительность к магнитному потоку, как и баллистический гальванометр, представляет собой в настоящее время актуальную задачу. Данная статья посвящена разработке схемы и узлов электронного прибора, предназначенного для измерения магнитного потока. Имея большую чувствительность, чем веберметр, он в то же время свободен от некоторых недостатков, присущих баллистическому гальванометру.

Электронный прибор, предназначенный для измерения магнитного потока, состоит из следующих блоков (рис. 1): шунта 1, интегрирующего усилителя 2, усилителя напряжения 3, зарядной цепи и пикового вольтметра 4.

Как известно, магнитный поток связан со вторичной э. д. с. соотношением

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

где e_2 — э. д. с., в;

w_2 — число витков измерительной катушки;

Φ — магнитный поток, вб.

Для того чтобы магнитный поток Φ определялся по э. д. с. e_2 , необходимо последнюю проинтегрировать по времени, что и осуществляется интегрирующим усилителем. Применение последнего дает возможность интегрирование в прямом канале заменить дифференцированием в канале отрицательной обратной связи, что позволяет значительно снизить погрешность интегрирования.

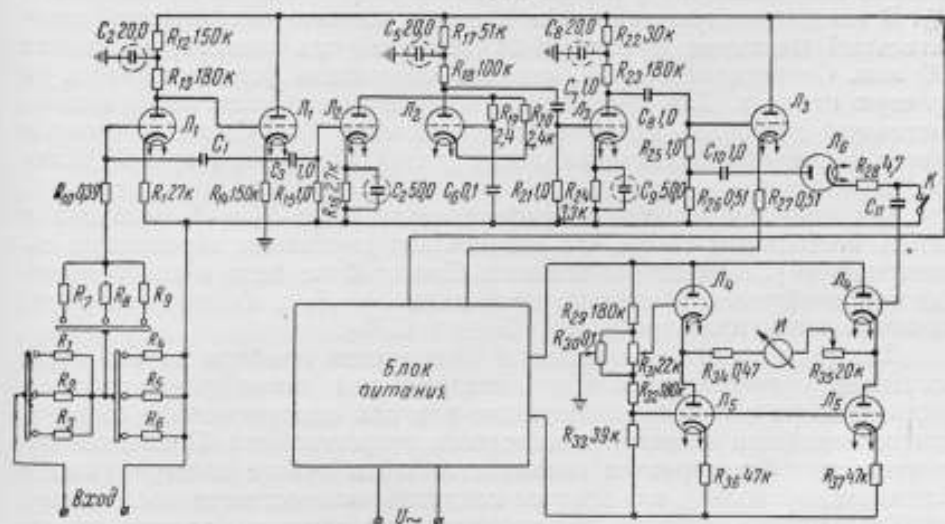


Рис. 2. Полная схема прибора.

Для увеличения чувствительности прибора после интегрирующего усилителя сигнал подается на усилитель напряжения. Конденсатор C , имеющий малую утечку, заряжается через диод до пикового значения входного сигнала. Сопротивление цепи заряда этой схемы мало, а сопротивление цепи разряда очень велико, порядка нескольких сотен мегом.

Напряжение на конденсаторе измеряется ламповым пиковым вольтметром, имеющим большое входное сопротивление во избежание шунтирования зарядной емкости измерительным устройством.

Таким образом, при $C = \text{const}$

$$U = CQ,$$

т. е. напряжение на конденсаторе пропорционально количеству электричества Q .

Полная схема прибора представлена на рис. 2. Как видно из схемы, сигнал с измерительной катушки через шунт поступает на интегрирующий усилитель, собранный на лампах L_1 типа 6Н2П. Сопротивление R_{10} и конденсатор C_1 являются элементами дифференцирующей цепочки в канале отрицательной обратной связи. Напряжение,

пропорциональное интегралу входной величины, усиливается трехкаскадным усилителем на лампах L_2 типа 6Н2П и L_3 типа 6Н1П.

Для согласования сравнительно большого сопротивления анодной цепи лампы L_3 с малым входным сопротивлением диода между указанными цепями поставлен катодный повторитель на правом триоде лампы L_3 . Лампа L_6 типа 6Х2П и конденсатор C_{11} представляют собой элементы зарядной цепи. Постоянная времени цепи заряда $\tau_{зар}$ много меньше постоянной времени цепи разряда $\tau_{раз}$ вследствие того, что прямое сопротивление диода мало, а обратное велико. Элементы зарядной цепи имеют высокое сопротивление изоляции относительно корпуса прибора.

Напряжение на конденсаторе C_{11} измеряется ламповым вольтметром, собранным по мостовой схеме на четырех триодах L_4 и L_5 типа 6Н2П. Подобные схемы имеют высокую стабильность работы, большое входное сопротивление и малую погрешность. Последняя не превышает 3%. В измерительную диагональ включен магнитоэлектрический измерительный механизм I типа М-24, имеющий ток полного отклонения 100 мка. Сопротивлением R_{30} стрелка измерителя устанавливается на нулевую отметку. Для изменения чувствительности вольтметра в измерительную диагональ включено сопротивление R_{35} . Схема устанавливается в исходное положение после разряда конденсатора C_{11} ключом K .

Как показали испытания прибора, накал ламп L_1 и L_2 необходимо питать постоянным током, что значительно уменьшает переменную составляющую усилителя напряжения. Для этой же цели и для устранения самовозбуждения анодные цепи ламп L_1 , L_2 и L_3 питаются через развязывающие фильтры C_2R_{12} , C_5R_{17} и C_8R_{22} .

Для расширения возможностей применения прибора на его входе поставлен универсальный шунт, позволяющий изменять чувствительность прибора в определенное число раз при одновременном сохранении постоянными входного и выходного сопротивлений. Последнее обстоятельство благоприятно сказывается и на работе интегрирующего усилителя, поскольку его входное сопротивление остается постоянным.

Градуировка прибора производится при помощи катушки взаимной индуктивности. Как показал опыт, зависимость отклонения подвижной части измерителя от тока, протекающего через катушку взаимной индуктивности, имеет прямолинейный характер.

Прибор заключен в железный кожух, что исключает влияние внешних электрических и магнитных полей на схему и позволяет использовать его в цеховых условиях.

Т. С. ЖУРАВЛЕВА

ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТЕХНИКЕ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье приведено описание датчиков э. д. с. Холла различных типов для измерения напряженности магнитного поля, даны их основные характеристики, рассмотрены достоинства и недостатки, изложены методы их использования в заводских условиях для контроля качества продукции.

Измерение основных магнитных величин (индукции, напряженности поля, проницаемости и др.) так или иначе основывается на двух главных законах электрического поля: на законе полного тока и законе электромагнитной индукции.

Разнообразные методы измерений — баллистический, индукционный, магнитных зондов, магнитометрический (для измерения напряженности магнитного поля и магнитного момента) — все это лишь различное воплощение в специальных условиях тех же законов полного тока и электромагнитной индукции.

Все эти методы измерения, ставшие классическими, вполне соответствуют требованиям измерительной техники в условиях научно-исследовательской лаборатории, но никак не в производственной обстановке. Тем более, что по мере роста выпуска продукции встают задачи стопроцентного контроля за ее качеством и задачи автоматизации этого процесса. Кроме того, иногда возникает необходимость в массовом определении основных магнитных величин, характеризующих данный магнитный материал.

Решение этих задач на базе классических методов магнитных измерений довольно трудно, а часто просто не осуществимо, поэтому необходимо было разработать новые методы измерений и контроля.

Известный с конца прошлого века эффект Холла дает удобный способ измерения напряженности магнитного поля (или его индукции). В последнее время сделано очень много по применению эффекта Холла для магнитных измерений — созданы новые приборы, использующие эффект Холла в полупроводниках.

Новейшие полупроводниковые соединения и уже широко применяемые германий, сурьмянистый индий и мышьяковистый индий дают возможность получить э. д. с. Холла такого значения, что ее измерение часто возможно без специального усиления.

Об эффекте Холла написано достаточно большое количество работ и поэтому нет нужды излагать подробно сущность этого эффекта, следует только просто напомнить о том, что э. д. с. Холла равна

$$e_x = R_x \frac{I_{\text{раб}} \cdot H}{d} \varphi, \quad (1)^*$$

где φ — функция, зависящая от геометрических размеров датчика;

e_x — э. д. с. Холла, в ;

R_x — постоянная Холла, $\text{см}^3/\text{к}$;

$I_{\text{раб}}$ — рабочий ток, а ;

d — толщина датчика, см ;

H — напряженность магнитного поля, э.

Если при изготовлении датчика взять отношение длины l к ширине b более двух, то функцию φ , определяющую зависимость э. д. с.

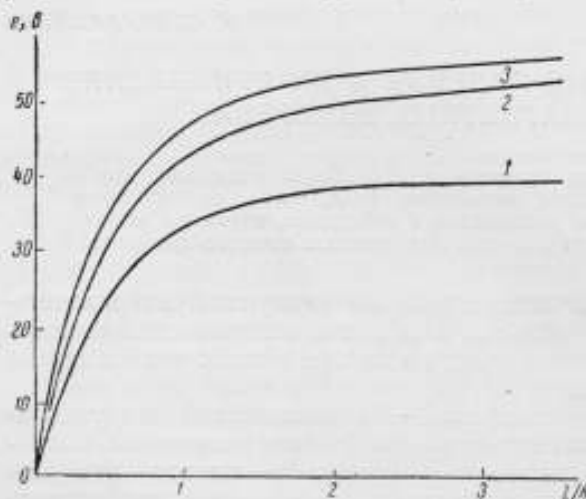


Рис. 1. Кривые зависимости э. д. с. Холла от геометрических размеров датчика:

1 — 8400 гс ; 2 — 11 800 гс ; 3 — 13 100 гс при $I = 24 \text{ ма}$

Холла от геометрических размеров датчика, можно опустить (рис. 1). Тогда формула для определения э. д. с. Холла окажется еще более простой

$$e_x = R_x \frac{I_{\text{раб}} \cdot H}{d}. \quad (2)$$

Во всех дальнейших рассуждениях будем иметь в виду именно эту формулу.

Датчики э. д. с. Холла можно разделить на две группы: кристаллические и пленочные. Рассмотрим каждую из этих групп.

Кристаллические датчики изготавливаются из сурьмянистого и мышьяковистого индия, германия,

сурьмянистого индия, легированного элементами третьей и пятой групп периодической системы Менделеева.

Остановимся на некоторых особенностях и свойствах датчиков, изготовленных из различных кристаллических материалов. Раньше всего стали применять в технике магнитных измерений германиевые датчики электронной проводимости. Германиевые датчики обладают большим входным и выходным сопротивлениями порядка 150—300 ом . Коэффициент передачи датчика на каждую тысячу эрстед напряженности магнитного поля составляет около 1,8% или в относительных единицах 0,018 (коэффициент передачи $K = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{вх}}}$), при этом э. д. с. Холла будет 1,08 в , если постоянная Холла равна 20 000 $\text{см}^3/\text{к}$, а рабочий ток порядка 200 ма . Датчики, изготовленные из более чистого германия, имеют постоянную Холла порядка 100 000—120 000 $\text{см}^3/\text{к}$, но тогда и сопротивление такого датчика возрастет значительно, а э. д. с. Холла будет превышать указанную выше величину в четыре—пять раз.

* Или $e_x = R_x \frac{I_{\text{раб}} B}{d} \varphi$, где B — магнитная индукция, гс ($\frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{см}^2}$).

Чувствительность γ датчиков, изготовленных из германия первого типа, будет $5,4 \text{ мв/а.э}$ и второго типа — 27 мв/а.э . Германиевые датчики обладают очень большой чувствительностью, что и определяет их широкое применение для целей магнитных измерений. Кроме того, зависимость постоянной Холла и сопротивления его от температуры не велики, о чем можно судить по тому, что коэффициент передачи меняется от изменения температуры на каждые 10°C всего на $0,5\%$, а сопротивление датчика при этом — на 5% .

Однако датчики из германия обладают сильным выпрямляющим эффектом. При работе на переменном рабочем токе это обстоятельство особенно приходится учитывать, так как э.д.с. Холла может очень сильно искажаться.

Датчики из сурьмянистого индия обладают другими недостатками. Во-первых, постоянная Холла этого материала значительно ниже, чем у германия — порядка $400\text{--}700 \text{ см}^3/\text{к}$, поэтому э.д.с. Холла достигает $50\text{--}60 \text{ мв}$ при рабочем токе 16 ма и изменении напряженности магнитного поля от нуля до 9300 э .

Во-вторых, датчики из сурьмянистого индия обладают очень значительной зависимостью постоянной Холла от температуры, то же самое можно сказать и о его сопротивлении. Коэффициент передачи с возрастанием температуры на 10°C уменьшается на 48% , а сопротивление падает на 13% при рабочем токе 16 ма и напряженности магнитного поля 13000 э , поэтому при применении датчиков из сурьмянистого индия нужно учитывать эту его отрицательную особенность и принимать меры для уменьшения ее влияния на измеряемую величину э.д.с. Холла.

Чувствительность датчиков из сурьмянистого индия составляет примерно $0,22 \text{ мв/а.э}$, коэффициент передачи $K=25\%$ при поле в 1000 э , а в поле 9000 э $K=59,5\%$. Такая величина коэффициента передачи выгодно отличает датчики из сурьмянистого индия от датчиков, изготовленных из других полупроводниковых материалов.

Датчики из мышьяковистого индия обладают следующими свойствами: чувствительность их примерно такая же, как и у датчиков из сурьмянистого индия — $0,28 \text{ мв/а.э}$; коэффициент передачи $K=2,5\%$, но изменение сопротивления и постоянной Холла в функции от температуры почти отсутствует (оно равно $0,5\%$ на каждые 10°C). Постоянная Холла их довольно низка: $180\text{--}200 \text{ см}^3/\text{к}$, однако есть надежда, что она может быть значительно увеличена.

Сурьмянистый индий, легированный кадмием, обладает почти такими же свойствами, как и сурьмянистый индий, но его чувствительность и коэффициент передачи сильно меняются от величины напряженности поля. Температурные же зависимости его примерно такие же, как и у сурьмянистого индия.

Таким образом, при сопоставлении свойств кристаллических датчиков, изготовленных из различных полупроводниковых материалов, можно сделать вывод, что каждый из них может найти специальное применение в зависимости от тех специфических условий, в которых они должны работать.

Вторая группа датчиков Холла — пленочные датчики, изготовленные, например, из селенида ртути. Пленочные датчики имеют довольно сложную технологию изготовления и, если кристаллические датчики можно изготовить без особых приспособлений кустарным путем, изготовление пленочных датчиков в таких условиях невозможно. Коэффициент передачи пленочных датчиков $K=1,8\%$ при $H=9200 \text{ э}$, а при

$H = 2700 \text{ э}$ $K = 0,5\%$. Чувствительность пленочных датчиков также ниже, чем у кристаллических датчиков; она равна $0,041 \text{ мв/а. э}$.

Вследствие этого область применения пленочных датчиков значительно уже, чем кристаллических, несмотря на то, что постоянная Холла, коэффициент передачи и сопротивление их не зависят от температуры. Основные характеристики датчиков обеих групп даны в таблице.

Датчики	$K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}, \%$	$R_{\text{Х}}, \text{ см}^2/\text{к}$	$\tau, \text{ мв/а. э}$
Кристаллические:			
сурьмянисто-индиевые	25	400—700	0,22
германиевые	1,8	20 000—50 000	5,4
мышьяковисто-индиевые	2,5	120—180	0,28
Пленочные:			
селенид ртути	0,5	40—80	0,041

Переходя к изложению методов использования датчиков э.д.с. Холла в заводских условиях для целей контроля качества продукции, следует остановиться на некоторых отрицательных их свойствах.

Основные недостатки датчиков э.д.с. Холла сводятся к следующему:

1. Постоянная Холла зависит от геометрических размеров датчиков (рис. 1). Во избежание этого следует применять датчики с отношением их длины к ширине $\frac{l}{b} > 2$.

2. Э.д.с. Холла искажается эффектом Эттинсгаузена, возникающим из-за того, что в полупроводниках есть различные по скорости электроны, на которые действует разная по величине сила: на медленные — электростатическая, на быстрые — электромагнитная, вследствие чего возникает поперечная разность температур на датчике. Это приводит к возникновению добавочной э.д.с., которая имеет ту же полярность, что и э.д.с. Холла, в связи с чем с источником этих погрешностей очень трудно бороться. Э.д.с. Холла может искажаться также эффектом Риги—Ледюка, обусловленным направленным тепловым движением электронов, которое возникает вследствие разности температур поперечных граней. Такое движение электронов в совокупности с внешним магнитным полем создает дополнительный нагрев продольных граней датчика, а следовательно, возникновение т.э.д.с. Риги—Ледюка. Эту погрешность легко устранить, применяя для питания схемы синусоидальный рабочий ток.

Э.д.с. Эттинсгаузена—Нерста появляется (так же, как и э.д.с. Риги—Ледюка) за счет разности температур нагрева поперечных граней датчика, с той, однако, разницей, что в результате продольного движения электронов на продольных гранях появится не т.э.д.с., а э.д.с. электрического характера. Влияние эффекта Нерста можно устранить путем применения синусоидального рабочего тока.

3. Зависимость э.д.с. Холла от температуры у датчиков, изготовленных из разного полупроводникового материала, различна, поэтому необходимо выбрать в соответствии с условиями работы такой полупроводниковый материал для датчиков, который больше всего будет отвечать поставленным требованиям.

Температурную зависимость постоянной Холла можно компенсировать путем применения специальных схем включения датчиков с нелинейными сопротивлениями, температурные коэффициенты которых противоположны по знаку коэффициенту датчика. Зависимость э. д. с. Холла от температуры окружающей среды для датчиков из сурьмянистого индия можно уменьшить, увеличивая рабочий ток, однако такой способ компенсации можно применить лишь в том случае, если по условиям работы датчика можно менять рабочий ток и если температура окружающей среды изменяется не более чем на 5°C . Одновременно надо учитывать, что чрезмерное увеличение рабочего тока может привести к перегреву датчика.

4. Для большинства полупроводниковых материалов характерна нелинейная зависимость между током и напряжением.

5. При работе датчика э. д. с. Холла под нагрузкой возникает вторичная э. д. с. Холла e_x^* . Величину ее можно определить по формуле

$$e_x^* = R_x \frac{I_{\text{нагр}} \cdot H}{d} F, \quad (3)$$

где F — некоторая функция, зависящая от геометрических размеров датчика;

$I_{\text{нагр}}$ — ток нагрузки в выходном контуре датчика.

Возникновение вторичной э. д. с. Холла приводит к тому, что при изменении сопротивления нагрузки становится нелинейной зависимость э. д. с. Холла в выходном контуре датчика от тока нагрузки. Кроме того, сопротивление датчика становится нелинейным, так как вторичная э. д. с. Холла меняет падение напряжения на датчике между входными контактами, а следовательно, меняет и подвижность носителей заряда со всеми вытекающими отсюда последствиями. Влияние вторичной э. д. с. Холла будет тем больше, чем выше коэффициент передачи.

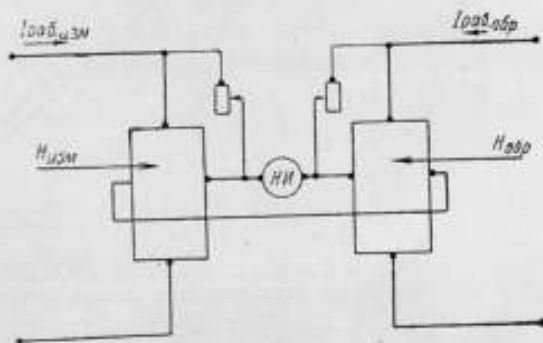


Рис. 2. Дифференциальная схема по напряжению.

6. Качество датчика сильно зависит от технологии его изготовления. Поскольку технология изготовления датчиков очень сложна, необходимы специальные условия для их производства.

Для того чтобы датчик Холла мог работать в той или иной установке, необходимо создать такую схему, которая по возможности устраняла бы наибольшее число погрешностей и недостатков самого датчика и давала бы возможность получать от него наибольший по величине сигнал.

Применение дифференциальных схем дает возможность решить эту задачу наиболее полно. Рассмотрим три дифференциальные схемы:

а) Дифференциальная схема по напряжению (рис. 2). Два датчика Холла (желательно с одинаковыми постоянными) вносятся в измеряемое поле и в известное. Возникшие на датчиках э. д. с. Холла подаются на нуль-индикатор, отклонение которого будет зависеть от разности между напряженностями обонх полей.

Такая установка для работы в производственных условиях вполне приемлема, так как результаты измерений на ней не зависят от температуры, если не имеет места внешний нагрев.

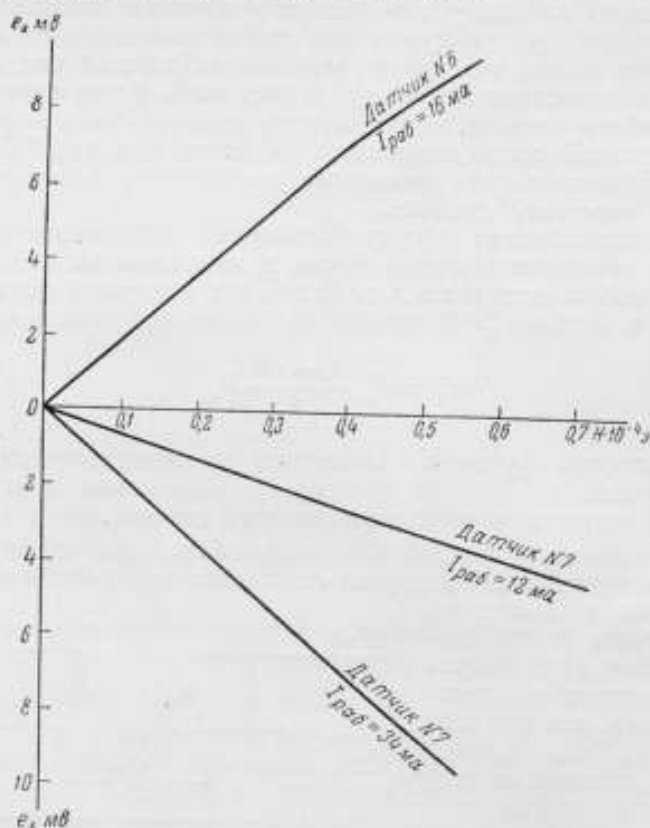


Рис. 3. Кривые зависимости э. д. с. Холла от напряженности поля при разных рабочих токах.

При этом важно, чтобы наклон характеристик $e_{x_{изм}} = f_1(H)$ и $e_{x_{обр}} = f_2(H)$ был вполне определенным (рис. 3). При равенстве напряженностей полей $e_{x_{изм}} = e_{x_{обр}}$

$$e_{x_{изм}} = \frac{R_{x_{изм}} \cdot I_{изм} \cdot H_{изм}}{d}; \quad e_{x_{обр}} = \frac{R_{x_{обр}} \cdot I_{обр} \cdot H_{обр}}{d};$$

$$\frac{R_{x_{изм}}}{d} = R'_{x_{изм}}; \quad \frac{R_{x_{обр}}}{d} = R'_{x_{обр}};$$

$$R'_{x_{изм}} \cdot I_{изм} \cdot H_{изм} \geq R'_{x_{обр}} \cdot I_{обр} \cdot H_{обр}; \quad (4)$$

и так как величины $R'_{x_{изм}}$, $I_{изм}$, $I_{обр}$, $R'_{x_{обр}}$ являются заданными или установленными при начале процесса измерения, то очевидно, что при равенстве $H_{изм}$ и $H_{обр}$ нуль-индикатор покажет нуль.

б) Дифференциальная схема по току (рис. 4). Принципиально эта схема не отличается от схемы рис. 2, только в ней нуль-индикатор должен реагировать не на разность напряжений, а на разность токов во вторичной цепи датчиков э. д. с. Холла. При этом существенно сле-

дующее: данную схему удобно осуществить лишь в том случае, если собственное внутреннее сопротивление датчика сравнимо с внутренним сопротивлением нуль-индикатора тока. Другими словами, сопротивление нуль-индикатора должно быть таким, чтобы сила тока во вторичном контуре датчика Холла была бы как можно больше. Так как в процессе работы схемы непрерывно меняется э. д. с. Холла, то будет непрерывно меняться и ток в выходном контуре датчика, что приведет

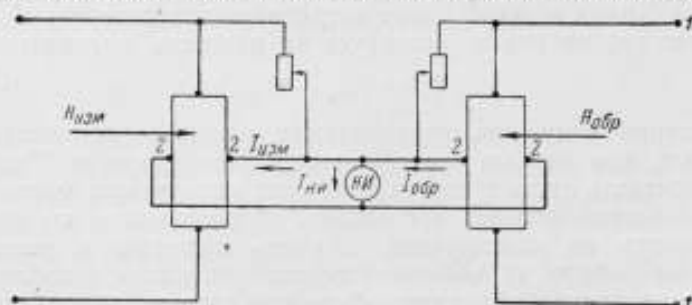


Рис. 4. Дифференциальная схема по току.

к непрерывному искажающему влиянию вторичной э. д. с. Холла. Все это легко показать на очень простых математических зависимостях.

$$I_{изм} = \frac{e_{X_{изм}}}{r_{X_{изм}} + r_{н.и.}}; \quad I_{обр} = \frac{e_{X_{обр}}}{r_{X_{обр}} + r_{н.и.}};$$

$r_{X_{изм}}$; $r_{X_{обр}}$ — сопротивление между контактами 2—2, соответственно для датчиков, реагирующих на измеряемое и образцовое поля;

$r_{н.и.}$ — сопротивление нуль-индикатора тока;

$$I_{н.и.} = I_{изм} - I_{обр};$$

$$I_{н.и.} = \frac{e_{X_{изм}}}{r_{X_{изм}} + r_{н.и.}} - \frac{e_{X_{обр}}}{r_{X_{обр}} + r_{н.и.}}; \quad (5)$$

$I_{н.и.}$ — ток, протекающий через нуль-индикатор.

в) Дифференциальная схема по магнитному потоку (рис. 5). Эта схема дает возможность осуществить весьма просто сравнение потока



Рис. 5. Дифференциальная схема по магнитному потоку.

испытываемого постоянного магнита с образцовым. В отличие от предыдущих схем здесь датчик э. д. с. Холла реагирует на разность магнитных потоков, образованных измеряемым и образцовым магнитами. Отсутствие э. д. с. Холла, подаваемых непосредственно на нуль-индикатор, свидетельствует о равенстве потоков сравниваемых магнитов. Неравенство потоков вызовет появление э. д. с., знак которой (при

питании датчика постоянным током) или фаза (при питании датчика переменным током) являются показателем того, какой из магнитов дает поток, больший по величине. В этой системе датчик э. д. с. Холла является непосредственно чувствительным элементом нуль-индикатора. Колебания рабочего тока и изменение постоянной датчика вследствие колебания температуры несколько изменяют чувствительность схемы, но, как правило, не вызывают смещения нуля.

Датчик Холла в такой схеме встраивается в поперечный стержень Н-образного сердечника и реагирует на разность магнитных потоков

$$\Phi_0 = \Phi_{\text{изм}} - \Phi_{\text{обр.}} \quad (6)$$

Магнитная индукция, определяемая по разности потоков, будет тем больше, чем меньше сечение поперечного стержня. Такую схему можно применить лишь в том случае, если испытуемые магниты имеют ярко выраженные полюсы. Установка, изготовленная по этой схеме, весьма проста по конструкции и очень надежна в эксплуатации. Однако при работе на ней необходимо учитывать, что постоянный магнит перед проверкой должен быть намагничен, а при транспортировке его к измерительной установке должны быть приняты меры, исключающие возможность искажения магнитной индукции в зазоре постоянного магнита.

В результате предварительной эксплуатации датчиков э. д. с. Холла в производственных условиях возникла необходимость специальной доработки некоторых вопросов, а именно: 1) увеличение надежности установок, использующих эффект Холла; 2) создание измерительных приборов, могущих удовлетворительно работать в комплексе с датчиками э. д. с. Холла; 3) разработка новой методики магнитных измерений новыми средствами.

Н. Е. ФЕВРАЛЕВА, С. Г. ТАРАНОВ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Статья посвящена применению эффекта Холла для определения характеристик ферромагнитных материалов как магнитотвердых, так и магнитомягких. Дано описание некоторых приборов, приведены их схемы и характеристики.

Эффект Холла находит все более широкое применение в измерительной технике. Отсутствие сложной аппаратуры и возможность отсчета измеряемых величин по показывающим приборам является преимуществом применения эффекта Холла в технике. К недостаткам следует отнести зависимость постоянной Холла и сопротивления полупроводников от температуры.

Эта зависимость особенно велика у германия и сурьмянистого индия, которые наиболее часто применяются для изготовления датчиков. При изменении окружающей температуры в широких пределах компенсация температурной погрешности является сложной задачей. Иногда прибегают к температурной стабилизации (прибор типа ИМИ-3). В этом случае специальный нагреватель, который поддерживает постоянную температуру пластины, помещают в кожухе датчика, что приводит к увеличению его размеров.

Влияние температурной погрешности схемы с датчиком Холла можно значительно уменьшить, если цену деления прибора перед измерением каждый раз устанавливать при помощи образцового магнита. На рис. 1 представлена схема многопредельного измерителя магнитной индукции, смонтированного в кожухе прибора М-82. В данном случае использован только измерительный механизм магнитоэлек-

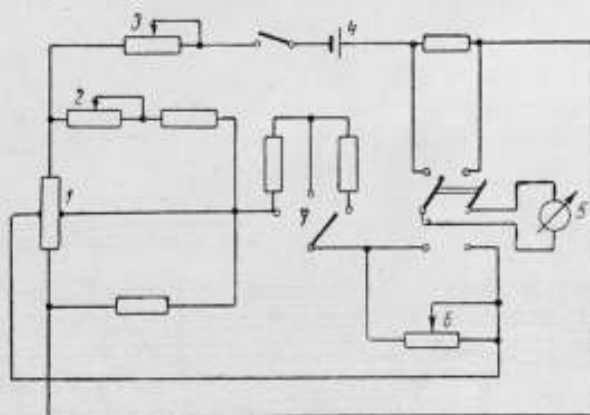


Рис. 1. Схема измерителя индукции.

трической системы 5, который служит как для контроля тока, проходящего через полупроводниковую пластину датчика, так и для определения э.д.с. Холла, пропорциональной измеряемой индукции.

Питание датчика 1 осуществляется от батареи 4 типа КБС-Л-0,5, встроенной в прибор. Ток питания регулируется сопротивлением 3. Установка нулевого положения стрелки прибора при измерении э.д.с. Холла производится сопротивлением 2. Переключатель 7 служит для изменения верхнего предела измерения прибора (1500; 3000; 6000 гс). Определение цены деления прибора производится при нахождении датчика

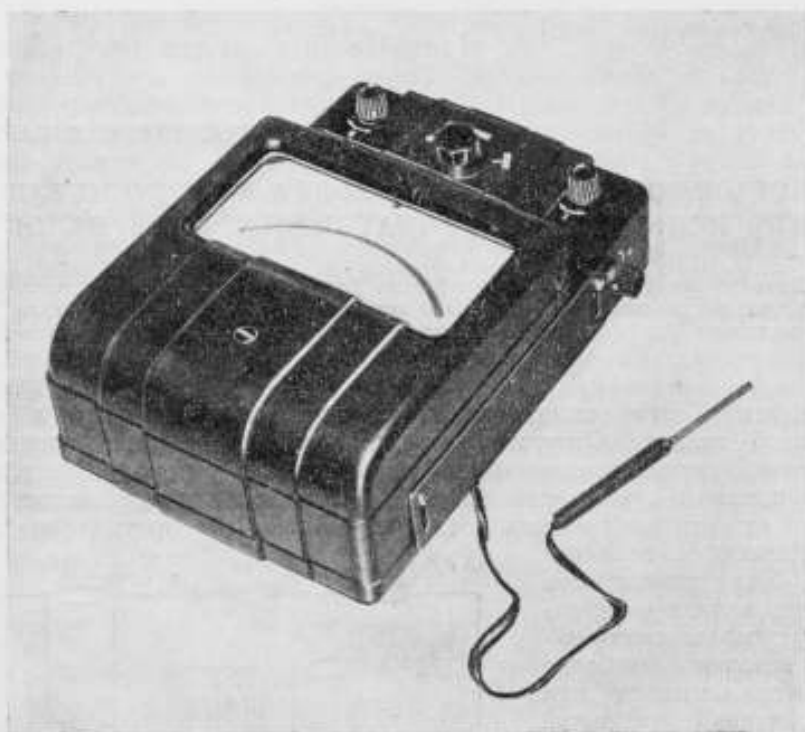


Рис. 2. Общий вид измерителя индукции с датчиком.

в поле магнита с известной индукцией в его зазоре. Изменением с сопротивлений 6 устанавливают стрелку прибора на число делений, соответствующих индукции образцового магнита.

Прибор имеет класс точности 2,5; ток питания датчика равен 15 ма; прибор может быть применен для работы при положительной температуре $10 \div 50^\circ\text{C}$ и максимальной относительной влажности 80%; вес прибора 3800 г. На рис. 2 дан его общий вид.

Измеритель магнитной индукции может быть выполнен в виде приставки к чувствительному милливольтметру, который присоединяется к специальным зажимам приставки и, в зависимости от положения переключателя, служит как для контроля тока питания, так и для измерения э.д.с. Холла.

В отличие от измерителей индукции, основанных на других принципах, прибор, использующий эффект Холла, имеет простую схему, дает возможность быстро производить измерение со сравнительно высокой точностью, имеет малые габариты и обладает большой чув-

ствительностью (чувствительность датчика достигает 40 мкв/гс). С помощью миниатюрного датчика можно определить топографию поля и измерить индукцию в зазорах (порядка 1 мм и меньше).

Измеритель индукции с использованием эффекта Холла может быть применен для измерения напряженности поля при определении размагничивающих участков гистерезисных петель магнитотвердых материалов. Применение эффекта Холла для этой цели дает возможность определять напряженность поля по показывающему прибору. При испытании постоянных магнитов в пермеамetre полупроводниковая пластина располагается вблизи поверхности магнита перпендикулярно направлению магнитного поля. Крепление датчика у поверхности магнита осуществляется при помощи простых конструкций. Установка цены деления прибора в этом случае может производиться в поле, которое создается намагничивающими катушками пермеамetra при определенном токе и расстоянии между полюсными наконечниками. Погрешность определения цены деления в этом случае зависит от погрешности определения поля при калибровании последнего, точности воспроизведения расстояния между полюсными наконечниками и точностью поддержания заданного тока.

Расхождения в результатах измерений напряженности поля в образцах магнитотвердых материалов, испытанных при помощи прибора с использованием эффекта Холла, и полученных импульсно-индукционным методом, не превышают 2%.

Желательно было бы осуществить с использованием эффекта Холла и измерение индукции. Это дало бы возможность производить быстро и точно измерение B и H непосредственно по приборам при плавном изменении намагничивающего поля, не прибегая к многократному выключению и переключению тока. В Институте электротехники АН УССР был разработан пермеаметр, в котором датчик Холла находится в измерительной щели, удаленной от магнита. В таком пермеамetre для компенсации поля намагничивающих катушек служат компенсирующие катушки.

В настоящее время ведутся работы по созданию нового пермеамetra, в котором измеритель индукции находится в щели, расположенной в непосредственной близости от испытываемого образца (в полюсном башмаке).

Устройство с использованием эффекта Холла может быть применено также в качестве чувствительного элемента при определении коэрцитивной силы магнитномягких материалов. Чувствительный элемент в этом случае служит указателем отсутствия намагничности испытываемого образца, при этом значение коэрцитивной силы определяют либо по размагничивающему току, либо по напряженности размагничивающего поля, которая может быть измерена датчиком Холла.

Для повышения чувствительности число датчиков Холла может быть увеличено. В частности, в коэрцитимetre Института электротехники АН УССР применялись четыре полупроводниковые пластины, которые были установлены попарно у концов испытываемого образца. Необходимость питания каждой пластины от независимого источника является недостатком данной схемы. При изготовлении пластин из сурьмянистого индия, который имеет небольшое сопротивление, питание пластин приходится осуществлять от аккумуляторных батарей. При выборе для пластин высокоомного германия аккумуляторные батареи могут быть заменены батареями ФБС-0,25 или КБС-Л-0,5.

При испытании материалов с малым значением коэрцитивной силы внешние магнитные поля оказывают влияние на чувствительный эле-

мент и производят дополнительное подмагничивание испытываемого образца, что вносит погрешность в результаты измерения. Кроме внешних полей, на результаты измерений оказывают действие поля, создаваемые контуром питания датчика. На рис. 3 схематически показано расположение испытываемой пластины и датчиков Холла.

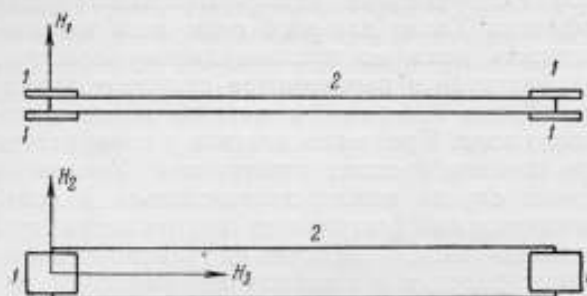


Рис. 3. Расположение датчиков Холла 1 у испытываемой пластины 2.

Рассмотрим действие посторонних полей на датчик Холла и испытываемую пластину. Вертикальная составляющая напряженности поля H_1 , пересекая полупроводниковую пластину, вызывает дополнительную э.д.с., которая вносит искажения в результаты измерений. Погрешность от этого поля и неэквивалентности припайки электродов устраняется компенсацией, которая производится при выключенном токе в размагничивающем устройстве и отсутствии испытываемого образца. Горизонтальные составляющие магнитных полей не оказывают влияния на величину напряжения Холла непосредственно. Вертикальная составляющая поля практически не производит намагничивания образца, так как он представляет собой тонкую пластину.

Горизонтальная поперечная составляющая внешнего поля H_2 производит намагничивание образца в направлении его ширины. Эта намагниченность обуславливает напряженность магнитного поля, которая может оказывать влияние на э.д.с. Холла. При симметричном расположении образца по отношению к датчику Холла поток, обусловленный намагниченностью образца, дважды пронизывает датчик в противоположных направлениях, и, следовательно, не оказывает влияния на э.д.с. Холла.

Горизонтальная составляющая внешнего поля, направленная вдоль длины образца H_3 , может производить дополнительное подмагничивание образца и тем самым вносить погрешность в измерение коэрцитивной силы. Для компенсации этой погрешности может быть применена дополнительная обмотка в размагничивающем устройстве или принято расположение испытываемого образца перпендикулярно горизонтальной составляющей мешающего поля, например поля земного магнетизма.

Положительные результаты компенсации погрешности от действия поля контура тока питания датчиков можно получить при бифилярном подключении проводников и пропускании тока в разных направлениях через пластину и латунный кожух, в который она помещена.

Опыт показал, что при определении коэрцитивной силы магнитно-мягких материалов типа армко и трансформаторной стали с требуемой точностью достаточно производить ориентацию соленоида перпендикулярно к горизонтальной составляющей поля земного магнетизма и осуществлять питание датчика по указанному способу.

Испытания коэрцитиметра показали хорошую повторяемость результатов измерения и большую чувствительность датчиков Холла.

П. Д. ГОРЕЦКИЙ, О. Н. РУМЯНЦЕВА

ОБ ОПЫТЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ХОЛЛА

В статье дано описание установки для автоматического измерения напряженности магнитного поля с помощью датчика Холла. Установка обеспечивает возможность осуществлять на самопишущих приборах запись распределения напряженности магнитного поля в системах постоянных магнитов.

Быстрое развитие ряда отраслей электровакуумной промышленности, использующих разнообразные магнитные системы, предъявило серьезные требования к технике измерения напряженности магнитных полей, так как возникла необходимость экспериментального определения топографии магнитного поля в районе взаимодействия с электронными пучками.

До последнего времени измерение напряженности магнитного поля в системах осуществлялось в основном с помощью индукционных методов (прежде всего на баллистических установках) или с помощью приборов типа М-19; М-119; ИМИ-3. На ряде предприятий в последние годы стали применять также осциллографический метод.

Основным неудобством всех этих методов (исключая осциллографический) является трудоемкость измерений. Для того чтобы снять картину распределения магнитного поля в системе, приходится делать не менее 10–20 измерений в различных точках. Это особенно неудобно при необходимости проконтролировать большое количество систем или сделать множество наблюдений на одной и той же системе. Определение напряженности поля по точкам снижает точность относительных измерений. Снятие же картины распределения резко неоднородных магнитных полей без соответствующих координатных приспособлений почти непосильная задача при использовании таких методов измерений. В связи с этим для измерения напряженности магнитного поля в системах постоянных магнитов был выбран гальваномагнитный метод, основанный на эффекте Холла в полупроводниках. Чувствительный элемент в зонде — датчик Холла из германия.

Датчики Холла дают э.д.с., непосредственно пропорциональную H (а не ее производной), что позволило на самопишущих приборах (без применения интегрирующих устройств) осуществить запись распределения напряженности магнитного поля в системах.

Электрическая схема включения датчика приведена на рис. 1. Сигнал с датчика Холла подается на самопишущие электронные потенциометры ЭПП-09, осуществляющие запись измеряемой величины в прямоугольной или полярной системе координат.

При этом использование датчика Холла с практически невыпрямляющими контактами позволило за одну установку зонда производить измерение полей обоих направлений.

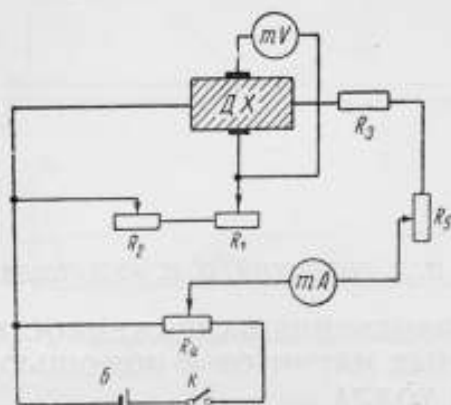


Рис. 1. Электрическая схема включения датчика Холла:

$R_1 = 220 \text{ ком}$, $R_2 = 10 \text{ ком}$, $R_3 = 100 \text{ ом}$, $R_4 = 6,8 \text{ ком}$, $R_5 = 590 \text{ ом}$; Б — батарея, 3–6 в; мА — миллиамперметр типа М104, кл. 0,5; мВ — милливольтметр типа ЭПП-0,9 кл. 0,5; К — ключ; ДХ — датчик Холла.

В действующем макете установки для автоматического измерения напряженности магнитного поля использованы два вида крепления зондов и их смещения. Измерения магнитного поля в осесимметричных магнитных системах осуществлялись по блок-схеме, приведенной на рис. 2. При отсутствии магнитного поля (вне системы) устанавливаются рабочий ток датчика с помощью сопротивлений R_1 и R_2 и нуль прибора, т. е. компенсируется э. д. с. асимметрии (рис. 1).

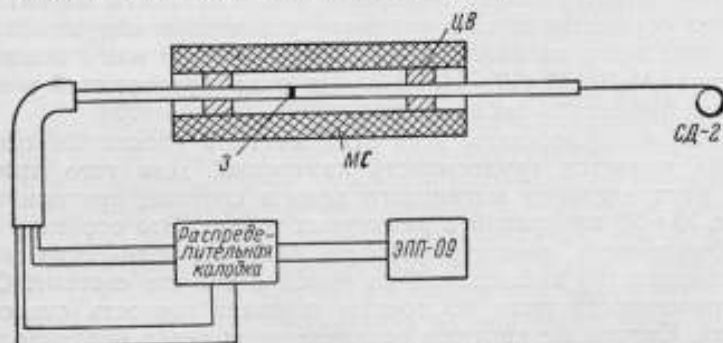


Рис. 2. Блок-схема измерения напряженности магнитного поля в осесимметричных магнитных системах.

Благодаря тому, что датчики Холла обладают прямолинейными вольт-амперными характеристиками, можно легко менять чувствительность зонда в довольно широких пределах без затруднительных пересчетов.

После установки рабочего тока, зонд З помещается в магнитную систему МС, где его положение фиксируется центрирующими втулками ЦВ. Смещение зонда осуществляется с помощью прикрепленной

к его концу нити, наматывающейся на ось барабанчика синхронного мотора СД-2. При синхронном включении лентопотяжного механизма электронного автоматического потенциометра ЭПП-09 и мотора СД-2 для протяжки зонда (при условии совпадения их линейных скоростей) на диаграммной ленте измерительного прибора получаем записанное в масштабе 1:1 распределение осевого магнитного поля при выбранном фиксированном положении системы.

В случае фокусировки шнуровых пучков обычно бывает достаточно измерения напряженности магнитного поля по оси магнитной системы.

Во всех других случаях необходимо записывать распределение магнитного поля во всем районе пучка, т. е. снимать в этом районе топографию поля.

При измерении систем с плоско-параллельными полюсными накопечниками используется «плоский» зонд, закрепленный на подставке, обеспечивающей его трехкоординатное смещение в объеме $30 \times 30 \times 80$ мм³, с автоматическим изменением одной координаты зонда.

Осуществление координатной установки для автоматического измерения напряженности магнитного поля в системах позволит значительно увеличить пределы изменения координат зонда.

В настоящее время предприняты первые попытки измерения на действующем макете установки поперечных составляющих напряженности магнитного поля в системах.

Измерительные зонды были проградуированы на баллистической установке, обеспечивающей точность измерения 3—4%, что заведомо снизило точность абсолютных измерений зондов. Градуировка датчиков проводилась при комнатной температуре 20°С. Погрешность относительных измерений итермостатированных зондов при $T = 20 \pm 5^\circ\text{C}$ определяется точностью используемых приборов и не превышает 1—1,5%. К преимуществам используемого метода следует отнести:

- 1) возможность автоматического снятия распределения напряженности магнитного поля, что значительно снижает время измерений;
- 2) наглядность получающихся данных и удобство их использования для расчетов;
- 3) достаточно высокую точность относительных измерений;
- 4) значительный интервал измеряемых полей ($1 \rightarrow 15000$ э); возможность быстрого изменения чувствительности зонда;
- 5) достаточно малые размеры зондов;
- 6) возможность измерения резко неоднородных полей обоих направлений за одну установку зонда;
- 7) отсутствие э. д. с. Холла в связи с использованием компенсационного метода измерения.

Недостатками осуществленного макета установки являются:

- 1) небольшие температурные границы применения итермостатированных зондов (обычно $\pm 10^\circ\text{C}$ относительно температуры градуировки);
- 2) недостаточная точность абсолютных измерений, что обусловлено отсутствием установки для градуировки датчика более высокого класса точности;
- 3) трудность измерения радиальных составляющих напряженности магнитного поля с помощью кристаллических датчиков конечной толщины, что определяется наличием в магнитных системах слишком большого соотношения между напряженностью осевого $H_{ос}$ и поперечного $H_{п}$ магнитных полей ($H_{ос} > 100 H_{п}$). Более эффективным для измерения поперечных составляющих напряженности магнитного поля является использование пленочных датчиков.

И. И. ПЕККЕР, В. Н. ТИТАРЕНКО

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Статья содержит изложение состояния вопроса технического контроля качества постоянных магнитов на специализированных предприятиях. Подчеркивается роль автоматизации измерений.

В 1957 г. был создан первый в СССР специализированный завод по производству литых постоянных магнитов в г. Новочеркасске. Выросли также цехи по производству постоянных магнитов на некоторых заводах Москвы, Орджоникидзе, Еревана и других городов. Но несмотря на создание таких производств, техническая оснащенность их еще не удовлетворяет современным требованиям.

В условиях современного специализированного предприятия даже при тщательном ведении технологического процесса имеет место значительный разброс магнитных свойств как между плавками изготовляемых магнитов, так и внутри одной плавки. Это подтверждается опытом многих предприятий. В качестве примера в таблице даны результаты измерений магнитных свойств магнитов из сплава альни четырех плавов, проведенных в практически одинаковых условиях на Новочеркасском заводе.

Номер плавки	Остаточная индукция, гс		Процент брака	
	наибольшая	наименьшая	по коэрцитивной силе	по остаточной индукции
1	5900	4280	1,2	3,6
2	5900	4180	1,7	6,0
3	5900	4360	2,5	8,0
4	5900	4360	1,9	16,0

Из данной таблицы видно, что хотя индукция колеблется для разных плавов примерно в одних и тех же пределах, процент брака по индукции в этих плавках составляет 3,6—16%.

Аналогичная картина наблюдается и для разных типов магнитов из других сплавов.

Наличие относительно высокого процента брака и значительный разброс магнитных свойств, даже в пределах одной плавки, делают необходимым проведение стопроцентного контроля.

При обнаружении негодных магнитов до подачи их на механическую обработку потери от брака будут значительно ниже, чем если этот брак будет обнаружен в процессе сборки и регулирования приборов или других устройств с постоянными магнитами.

В настоящее время вследствие большой трудоемкости операций контроля стопроцентный контроль (баллистическим методом) осуществляется только по особо ответственным типам магнитов. Массовые же типы контролируются только выборочно (2% от каждой плавки).

Приведенные данные показывают, что в настоящее время назрела необходимость создания высокопроизводительных автоматизированных средств контроля постоянных магнитов. Насколько нам известно, таких автоматических установок промышленность не выпускает. Некоторую работу в этом направлении ведут совместно Новочеркасский завод постоянных магнитов и Новочеркасский политехнический институт, где разработаны и изготовлены первые образцы автоматических и полуавтоматических устройств, позволяющие поднять производительность труда на контрольных операциях и повысить качество контроля.

Уже внедрен и в течение двух лет эксплуатируется прибор для контроля магнитов электрических счетчиков, основанный на использовании эффекта Холла и дифференциальной магнитной системы. В настоящее время находится в стадии внедрения автомат для этого контроля — полуавтоматическая установка для записи гистерезисных циклов. Разработан и изготавливается автомат для контроля внутрирабочных магнитов.

Проводимые работы далеко не обеспечивают разрешение всех задач автоматизации контроля постоянных магнитов. Необходимо расширение фронта работ в этом направлении путем привлечения специализированных приборостроительных заводов.

Приборостроительные и машиностроительные заводы, заказывая специализированным предприятиям постоянные магниты, в технических условиях указывают обычно требования по ГОСТ на материалы (коэрцитивную силу и остаточную индукцию), при этом совершенно не учитываются реальные свойства магнитной системы, связанные с ее конфигурацией. В большинстве случаев также не оговаривается точность и методика измерений.

Такая нечеткая постановка задачи не стимулирует полного использования магнитных свойств постоянных магнитов, а также порождает недоразумения при оценке их качеств.

Как известно, свойства магнитных материалов обычно оцениваются по образцам, имеющим правильную геометрическую форму (цилиндр или призма). В то же время большинство постоянных магнитов, применяемых в промышленности, имеет довольно сложную форму. В таких случаях имеет смысл говорить о рабочем потоке, создаваемом в зазоре магнитной системы определенной конфигурации. Величина этого потока как раз и определяет рабочие характеристики магнита. Контроль величины остаточной индукции и коэрцитивной силы не позволяет выяснить, обеспечит ли данный магнит требуемый рабочий поток.

На рис. 1 приведены характеристики размагничивания двух постоянных магнитов, имеющих одинаковые значения B_r и H_c , но разную степень выпуклости гистерезисной кривой при одной и той же проводимости внешней магнитной цепи.

Исходные точки линий возврата будут точки B_1 и B_2 , а рабочие точки — соответственно B_5 и B_6 . При намагничивании магнита с арматурой рабочие точки будут соответственно B_3 и B_4 .

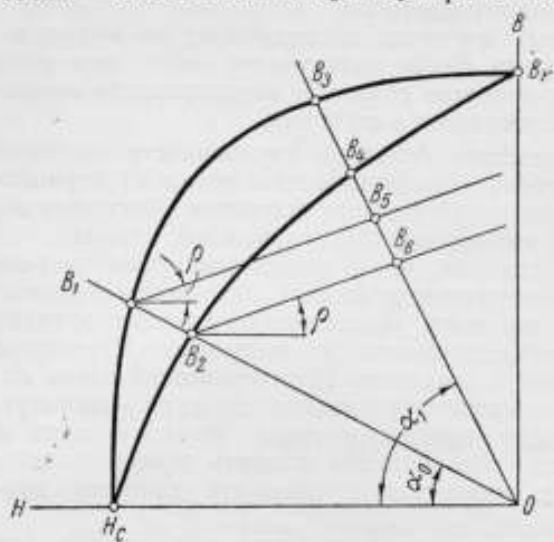


Рис. 1. Сравнение характеристик двух постоянных магнитов, имеющих одинаковые B_r и H_c , но разную выпуклость кривой размагничивания; ρ — угол наклона линии возврата; α_0 и α_1 — углы, соответствующие проводимости внешней магнитной цепи без арматуры и с арматурой.

На рис. 2 показаны характеристики одного и того же магнита при разной магнитной проводимости системы (точки B_2 и B_3).

Из приведенных рисунков видно, что задание величин B_r и H_c не обеспечивает однозначного определения величины рабочего потока.

Иногда заказчики просят повысить величину B_r , не обращая внимания на величину коэрцитивной силы. В результате магнит с большей остаточной индукцией обеспечивает меньший рабочий поток, как это показано на рис. 3 (точки B_2 и B_1).

Требования некоторых заказчиков определять остаточную индукцию и коэрцитивную силу материала, независимо от конфигурации

магнита, порождают неопределенность в оценке свойств изделия.

При измерении этих величин на целых магнитах неопределенность возникает вследствие непостоянства сечения магнита по его длине и наличия потоков рассеяния. Это влечет за собой то, что на разных участках магнита измеренные значения остаточной индукции и коэрцитивной силы будут различны.

В некоторых случаях предлагают вырезать из магнитов образцы правильной формы и на них производить измерения.

В результате проведенных нами опытов было установлено, что свойства образцов, вырезанных из разных участков одного и того же магнита, отличаются на 20—30%. Это вполне естественно, поскольку скорость охлаждения различных участков магнита сложной конфигурации неодинакова.

Отлично также и воздействие магнитного поля на разные участки магнитов, подвергающихся термомагнитной обработке.

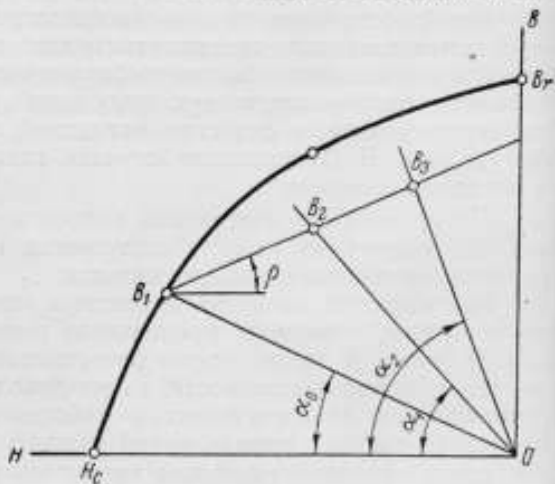


Рис. 2. Положение рабочей точки магнита при разных конфигурациях магнитной системы; углы α_1 и α_2 соответствуют проводимости магнитной системы при различной конфигурации арматуры.

В новом ГОСТ 9575 предлагается оценивать качество постоянных магнитов по «свидетелям» правильной формы, прошедшим одинаковую обработку вместе с данными магнитами. Такое предложение не дает решения задачи, так как вследствие разницы их конфигураций у них будут различные скорости охлаждения, а следовательно, и различные свойства. «Свидетели» могут характеризовать только свойства материала, но ни в коем случае не магнита.

В существующих нормах и технических условиях, как правило, не оговариваются вопросы старения и магнитной подготовки образцов перед измерениями; это также порождает значительную неопределенность и неточность в оценке качества магнитов.

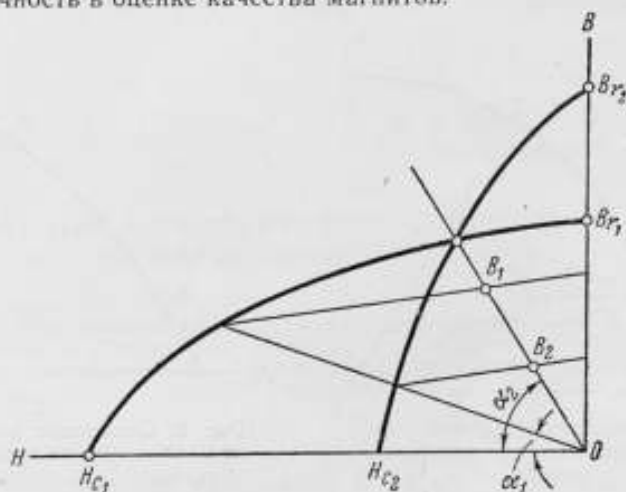


Рис. 3. Сравнение характеристик двух постоянных магнитов с различными значениями B_r и H_c .

Из сказанного выше видно, что до сих пор отсутствует общепринятая научно обоснованная методика оценки свойств постоянных магнитов как конструктивных элементов. Это тормозит технический прогресс в области создания новых, более совершенных типов постоянных магнитов, порождает недоразумения между их потребителями и поставщиками.

В настоящее время в промышленности используют сотни постоянных магнитов различных конфигураций. Многие из них имеют серьезные недостатки, нетехнологичны, дают низкий коэффициент использования дорогостоящих сплавов. Такое положение сложилось исторически вследствие распыленности производства, отсутствия единого координирующего центра, распыления инженерных и научных сил и отсутствия руководящих и справочных материалов по конструированию и применению постоянных магнитов.

Отсутствие унификации и большое число типоразмеров постоянных магнитов (что не всегда оправдано) являются серьезным препятствием на пути автоматизации производства и контроля. Назрела насущная необходимость выпуска нормалей на конструкции постоянных магнитов, причем в этих нормалях должны быть четко и правильно указаны свойства изделий данной конфигурации и методика их определения.

Основной целью контроля постоянных магнитов должно быть определение того, могут ли они создать требуемый поток в системе заданной конфигурации. Из этого следует, что технический контроль постоянных магнитов может быть осуществлен двумя способами.

В тех случаях, когда это не вызывает больших трудностей, целесообразно помещать контролируемый магнит в систему, аналогичную рабочей. При этом магнит должен оцениваться по величине потока, создаваемого им в рабочем зазоре системы (точка Φ_1 на рис. 4).

В качестве второго метода можно принять контроль значений потока на участке кривой размагничивания в ее рабочей области (участок $\Phi_1\Phi_2$, рис. 5).

Измерение потока целесообразно проводить не баллистическим методом, а с помощью датчиков э. д. с. Холла, ферромагнитных зондов с выходом на двойной частоте или других подобных им элементов, существенно упрощающих и убастряющих проведение измерений.

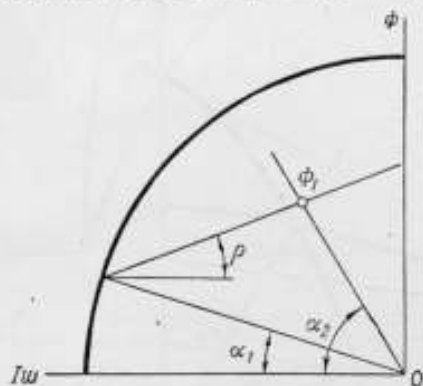


Рис. 4. Определение рабочей точки (рабочего потока Φ_1) испытуемого магнита.

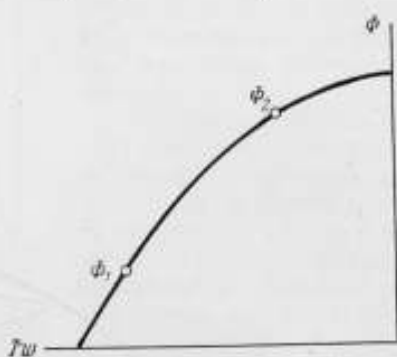


Рис. 5. Положение рабочего участка Φ_1 и Φ_2 на кривой размагничивания постоянного магнита.

Имеющийся у нас опыт показывает, что в производственных условиях баллистический метод не обеспечивает требуемой производительности измерений и трудно поддается автоматизации. В то же время, используя современные чувствительные элементы (датчики э. д. с. Холла и др.) в сочетании с соответствующей электронной аппаратурой, можно успешно решить многие задачи автоматизации магнитных измерений.

Для целей технического контроля нет нужды проводить непосредственное измерение величины потока. Во многих случаях его можно заменить сравнением потоков образцового и испытуемого магнитов, при этом весьма важным является вопрос о стабильности магнитных свойств образцов.

При разработке методики контроля необходимо обратить особое внимание на определение характера магнитной подготовки перед измерениями, а также на вопросы, связанные со старением магнитов. До сих пор в литературе отсутствуют четкие указания по этому вопросу, что порождает трудности технического контроля. Научные организации должны оказать помощь заводам и внести ясность в эти вопросы.

В заключение следует еще раз отметить важность унификации постоянных магнитов, без чего невозможно усовершенствование методики их контроля. Необходимо также разработать ГОСТ или хотя бы ведомственные нормы на методику технического контроля постоянных магнитов с учетом автоматизации процессов контроля и возможности применения современных прогрессивных средств измерения.

И. И. ПЕККЕР, А. Д. ДОМАНОВ,
Н. Ф. ШМОЙЛОВ, А. Н. КОМОВ

АВТОМАТ ДЛЯ РАЗБРАКОВКИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ПО МАГНИТНЫМ СВОЙСТВАМ

В статье дано описание автомата высокой производительности (с применением датчиков Холла) для разбраковки постоянных магнитов путем сравнения участка кривой размагничивания испытуемого и образцового магнитов.

Технология производства постоянных магнитов не обеспечивает достаточного единообразия их свойств. В то же время для многих устройств требуются постоянные магниты с вполне определенными свойствами. В связи с этим необходим тщательный технический контроль их качества.

Применявшиеся до сих пор измерительные устройства для определения магнитных свойств магнитов были рассчитаны на неавтоматический контроль. Операции контроля при этом были весьма трудоемкими, а точность измерений часто не очень высокой. Растущие масштабы выпуска постоянных магнитов делают необходимой автоматизацию контроля.

По заданию Новочеркасского завода постоянных магнитов сотрудниками кафедры автоматических и измерительных устройств Новочеркасского политехнического института был разработан и изготовлен автомат для разбраковки по магнитным свойствам постоянных магнитов для счетчиков электрической энергии. В настоящее время автомат испытан в производственных условиях и в ближайшее время будет включен в нормальную эксплуатацию.

Автомат производит сортировку магнитов путем сравнения рабочего участка кривой размагничивания испытуемого и образцового магнитов. Несколько типичных случаев сравнения показано на рис. 1. Мы полагаем, что такой метод контроля дает больше оснований для суждения о качестве магнита, чем оценка по величинам остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c . Сравнение ведется в координатах: «поток во внешней магнитной цепи, создаваемый магнитом Φ » и «величина размагничивающей силы, приложенной к концам магнита Iw ». Эти величины при единообразном методе измерения определяются совершенно однозначно. Можно вместо них ввести условные значения индукции, определяемой как некоторый поток, деленный на некоторое расчетное

сечение, и напряженность поля, определенную как размагничивающая сила, деленная на некоторую расчетную длину.

Но это ничего не даст, кроме путаницы в терминологии. «Истинные» значения индукции и напряженности поля в разных точках магнита различны и их определение обычными методами технического контроля невозможно, поэтому задание характеристики магнита в виде зависимости индукции от напряженности для целей технического контроля мы считаем нецелесообразным.

Известно, что «сырые» магниты непосредственно после отливки имеют нестабильные магнитные свойства. Стабилизация их должна быть обеспечена в специальных устройствах, не связанных непосредственно с автоматом. Для повышения единообразия и исключения влияния предыдущего магнитного состояния на результаты контроля в автомате перед операцией измерения дается один цикл полного перемагничивания образца, который затем намагничивается до насыщения и размагничивается. Измерение магнитных свойств ведется в процессе размагничивания.

Операция размагничивания нужна также для того, чтобы подготовить магнит к следующим операциям, на которые он должен поступать размагниченным.

Разработанный нами автомат обеспечивает полную автоматизацию процесса контроля.

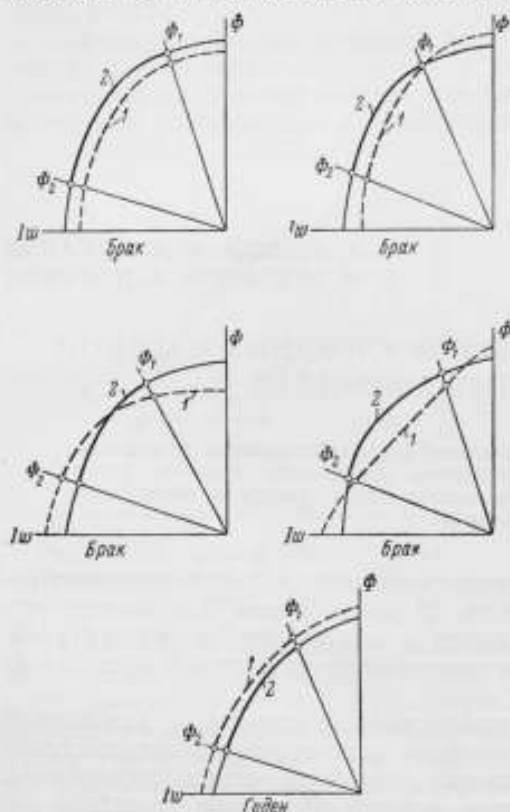


Рис. 1. Различные случаи сравнения характеристик размагничивания магнитов:
1 — испытуемого и 2 — образцового.

Испытуемые магниты загружаются «навалом» в бункер автомата и в зависимости от результатов контроля разбрасываются по сортовым ящикам.

Блочная схема автомата представлена на рис. 2. Работа его осуществляется следующим образом. В бункер загрузочного устройства БЗУ магниты загружаются «навалом». Механизм БЗУ, приводимый в действие двигателем ДВ₁, захватывает магниты, ориентирует их определенным образом и подает в магазин М (накопитель). Количество магнитов, захватываемых в течение одного рабочего такта механизмом БЗУ, непостоянно, оно определяется вероятностными законами. Накопитель служит для обеспечения равномерной загрузки последующих блоков автомата. Из накопителя магниты поступают в питатель ПТ. Питатель работает с принудительным ритмом. За каждый шаг (такт) работы он выдает по одному магниту, направляемому в свободное гнездо конвейера карусельного типа КНВ, который представляет собой диск с четырьмя симметрично расположенными гнездами. За один рабочий такт конвейер поворачивается на четверть окружности. Таким образом,

Конструктивные особенности всех этих узлов автомата определяются выполняемыми функциями, геометрической формой (рис. 3) и размерами магнита (рис. 4).

Исследования показали, что наиболее удобная ориентация магнита для органа захвата и других узлов автомата, оказалась ориентация по оси X_1X_2 (рис. 3) в правом или левом направлении и ориентация по углу α , при этом удобной базой для захвата в этом случае, явилась впадина магнита, которая и определила собой конструкцию органа захвата.

Магнит, поставленный этой впадиной на линейку, держится на ней устойчиво и надежно, обеспечивая заданную ориентацию (рис. 5).

Процесс захвата магнита на линейку осуществляется путем перемещения линейки параллельно самой себе в пространство бункера, хаотически заполненного магнитами. Для осуществления такого перемещения линеек они укрепляются

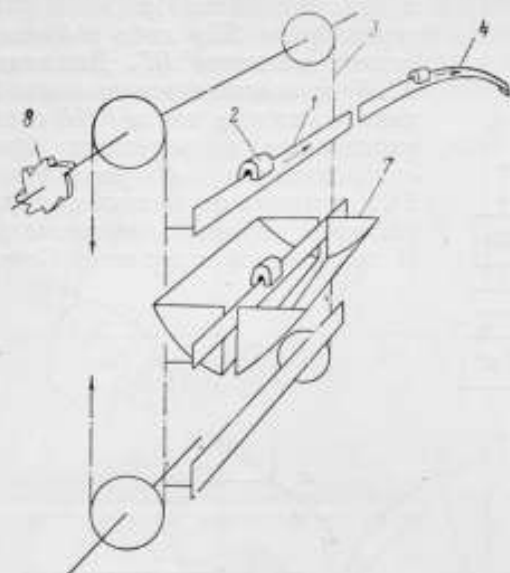


Рис. 6. Схема механизма извлечения магнита из бункера БЗУ:

1 — линейка элеватора; 2 — магнит; 3 — цепь элеватора; 4 — линейка накопителя; 7 — щелевой бункер; 8 — храповое колесо.

на параллельных цепях и движутся вместе с цепями как пластины транспортера.

Движение транспортера производится храповым механизмом с таким расчетом, чтобы каждая линейка останавливалась с достаточной точностью против линейки накопителя (рис. 5, 6). Переход магнитов с линейки транспортера на линейку накопителя происходит принудительно под воздействием пальца сбрасывателя.

Испытания промышленного образца БЗУ показали, что оптимальная средняя скорость линейки транспортера равна от 0,02 до 0,03 мм в секунду. Производительность БЗУ при этой скорости хорошо согласуется с формулой

$$m_{\text{ср}} = L(\beta H + a),$$

где $m_{\text{ср}}$ — среднее число магнитов, захваченных одной линейкой;

L — полезная длина линейки, м;

H — путь, пройденный линейкой в материале (в бункере), м;

$\beta = 12$; $a = 2$ — опытные коэффициенты.

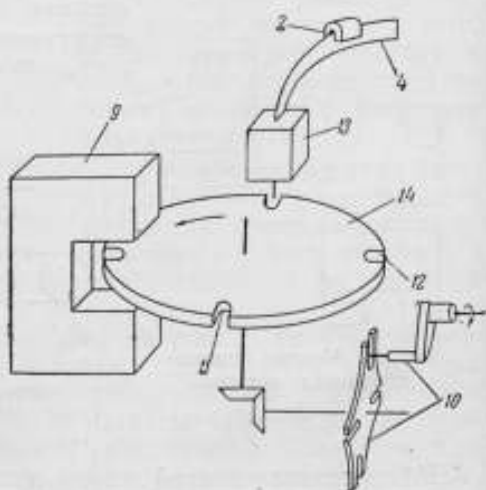


Рис. 7. Схема работы конвейера карусельного типа:

2 — магнит; 4 — линейка накопителя; 9 — переметр; 10 — мальтийский механизм; 11 — выход браны; 12 — выход годных; 13 — питатель; 14 — конвейер карусельный.

После того как магниты попали на линейку накопителя, они дальше продолжают движение самотеком (силой веса), заполняя приемную камеру питателя (рис. 7). Из питателя магниты попадают в приемные гнезда конвейера карусельного типа, затем последовательно проходят три перемещения с остановками: 1) от питателя в пермеаметр; 2) от пермеаметра к выходу брака и 3) если магнит годен, то он продолжает двигаться от бункера «брак» к бункеру «выход годных» (на рис. 7 бункеры «выход годных» и «брак» не обозначены).

Периодическое движение конвейера осуществляется мальтийским механизмом.

Пермеаметр. Эскиз пермеаметра* изображен на рис. 8. Он представляет собой трехстержневую магнитную систему.

На крайних стержнях расположены намагничивающие катушки. В центральном стержне имеется поперечный воздушный зазор, в который вставляется датчик э. д. с. Холла 3. Для повышения чувствительности полюсы, образующие зазор, имеют уменьшенное сечение, что позволяет концентрировать поток в месте расположения датчика. Между полюсами центрального и бокового стержней располагаются испытуемый и образцовый магниты 2 и 4. Катушки пермеаметра расположены и соединены таким образом, что создаваемые ими потоки направлены в наружном контуре магнитной системы согласно, а в центральном стержне встречно. Если магнитные характеристики испытуемого и образцового магнита

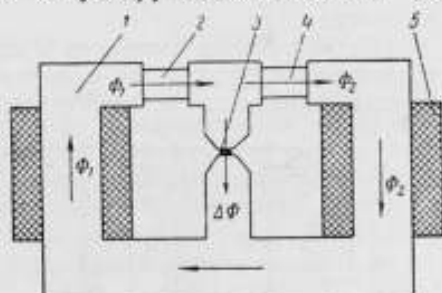


Рис. 8. Эскиз пермеаметра:

1 — край пермеаметра; 2 и 4 — образцовый и испытуемый магниты; 3 — датчик Холла; 5 — обмотка пермеаметра.

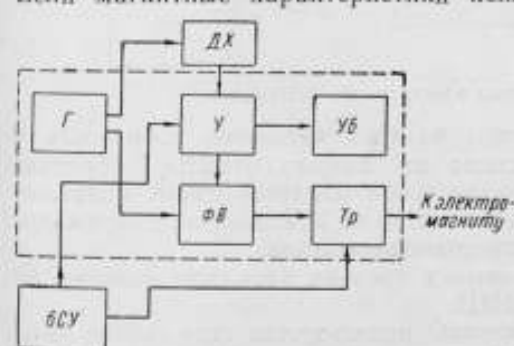


Рис. 9. Блочная схема электронного устройства.

одинаковы, то в центральном стержне поток отсутствует. В противном случае, через центральный стержень, а следовательно, и через датчик Холла, проходит разность потоков. По фазе э. д. с. Холла, вызываемой этим потоком в датчике, можно судить, поток какого магнита больше — образцового или испытуемого. Для того чтобы исключить погрешность от плохого «магнитного контакта», между магнитами и полюсами введен воздушный зазор. При этом неточность установки магнита (в определенных пределах), неоднородность их поверхности, на результаты измерения практически не влияют.

Ошибка за счет отклонения размеров при контроле необработанных магнитов не компенсируется.

Электронное измерительное устройство. Электронное измерительное устройство предназначено для сравнения потоков испытуемого и образцового магнитов при прохождении ими «спинки» предельного гистерезисного цикла во время размагничивания. Оно состоит из следующих основных блоков (рис. 9): 1) генератор Γ синусоидаль-

* Пеккер И. И. Дифференциальный пермеаметр. Авторское свидетельство № 131407, Бюллетень изобретений, № 17, 1960.

ного напряжения; 2) датчик Холла ДХ; 3) усилитель напряжения У; 4) фазочувствительный выпрямитель ФВ; 5) триггер Тр; 6) устройство, ограничивающее время измерения БСУ; 7) указатель баланса УБ.

Генератор синусоидального напряжения собран на половине лампы 6Н15П по обычной LC схеме. Частота генератора 3900 гц выбрана из условий помехоустойчивости, с учетом времени измерения.

Генератор питает датчик Холла и схему фазочувствительного выпрямителя.

Датчик Холла выполнен в виде пластинки из сурьмянистого индия размерами 4×8×0,4 мм с четырьмя электродами. Включение датчика осуществляется по обычной схеме.

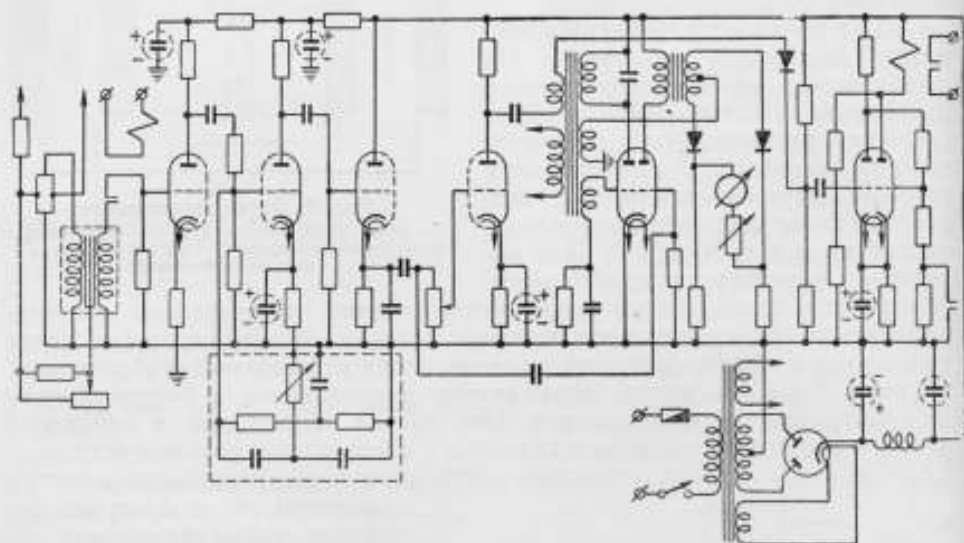


Рис. 10. Принципиальная схема электронного устройства.

Усилитель напряжения состоит из трех каскадов, собранных по обычной реостатно-емкостной схеме на лампах 6Н2П. Т-образный фильтр, включенный в цепь отрицательной обратной связи, ослабляет сигналы всех частот, кроме полезного сигнала. Усиление по напряжению также достигается за счет входного трансформатора.

Для согласования между вторым и третьим каскадом включен катодный повторитель на лампе 6Н1П.

Фазочувствительный выпрямитель используется для учета фазы входного сигнала. Согласно техническому заданию схема автомата должна различать бракованные магниты от годных и срабатывать на каждый годный магнит, поэтому схема фазочувствительного выпрямителя предусматривает на выходе сигнал одной полярности, соответствующей годному магниту. Появление напряжения противоположной полярности исключено, так как собрана только одна половина обычного фазочувствительного выпрямителя.

В случае прохождения бракованного магнита напряжение на выходе отсутствует. Такое схемное решение повышает надежность управления триггером.

Триггер собран на лампе 6Н1П с анодно-сеточными связями и автоматическим смещением. В анодной цепи включено электромагнитное реле типа МКУ-48, работающее как триггер.

При прохождении годного магнита перебрасывается триггер, вызывая срабатывание реле.

В случае прохождения бракованного магнита триггер сохраняет нормальное состояние, в котором он находится до начала измерительного цикла. Триггер возвращается в исходное состояние перекосом плеч делителя, совершаемым контактами БСУ.

Указатель баланса собран по схеме фазочувствительного выпрямителя, нагрузкой которого является стрелочный прибор. Он служит для симметрирования магнитной системы и установки пульта датчика Холла при настройке автомата.

Принципиальная схема электронной части автомата приведена на рис. 10.

Блок синхронизации и управления. В первом варианте конструкции автомата применен блок синхронизации и управления в виде релейно-контакторной панели.

В разрабатываемом в настоящее время варианте автомата блок синхронизации и управления выполняется в виде кулачкового контроллера, связанного с карусельным конвейером через редуктор. Последняя система проще и дешевле, более компактна (монтируется в одном корпусе с КНВ), устойчива в работе.

Механизм автомата, как это видно из приведенного выше описания, приспособлен для работы только с одним типом магнитов. Все же остальные элементы являются универсальными и могут, с некоторыми изменениями, использоваться в автоматах для сортировки других типов магнитов.

На базе разработанного образца может быть создана серия автоматов для сортировки многих типов постоянных магнитов.

Производительность автомата составляет примерно 25 шт. в минуту, т. е. порядка 10 000 шт. в смену. Автомат может заменить труд 8÷10 контроллеров, работающих с неавтоматической аппаратурой.

А. Н. КОМОВ

ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ К АВТОМАТУ ДЛЯ РАЗБРАКОВКИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Статья содержит описание электронного усилителя, работающего в автомате для разбраковки постоянных магнитов с использованием датчиков Холла.

Электронный усилитель, работающий в системе автоматического контроля постоянных магнитов, обладает рядом особенностей, которые обеспечивают возможность применения его в условиях больших перегрузок сигналом и помехами. Измерительное устройство, с которым работает усилитель, представляет собой магнитную дифференциальную систему.* В зависимости от магнитных характеристик испытуемого и образцового магнита, в диагонали магнитной системы возникает поток

$$\Delta\Phi = \Phi_0 - \Phi_n, \quad (1)$$

где Φ_0 — поток, проходящий через плечо с образцовым магнитом;
 Φ_n — поток, проходящий через плечо с испытуемым магнитом.

Из формулы (1) видно, что чем больше разнятся образцовый и испытуемый магниты, тем больше поток $\Delta\Phi$.

В диагонали магнитной системы установлен индикатор магнитного потока. В настоящей конструкции в качестве индикатора был использован датчик э. д. с. Холла. Питание датчика осуществляется переменным током повышенной частоты. Основное назначение усилителя состоит в усилении сигнала, возникающего на выходе датчика, до величины, необходимой для срабатывания фазочувствительного триггера. Кроме того, усилитель должен обладать свойством избирательности фазы.

Рассмотрим требования, предъявляемые к усилителю. Для этого необходимо рассмотреть основные характеристики измерительной системы.

Выбор частоты обосновывается временем прохождения «спинки» петли гистерезисного цикла, когда происходит сравнение магнитов.

* См. статью настоящего сборника, стр. 123.

Если исходить из условий, что за время измерения должно пройти n периодов синусоидального напряжения, то

$$f = \frac{n}{t}, \quad (2)$$

где f — необходимая частота напряжения, питающего датчик;
 n — необходимое число периодов, проходящих за время измерения.

Частота напряжения питания датчика э. д. с. Холла была выбрана равной 4 кГц.

Минимальное напряжение, которое должен чувствовать усилитель, определяется чувствительностью измерительной системы, чувствительностью датчика и заданной точностью, с которой сравниваются магниты.

Так как выходное сопротивление датчика э. д. с. Холла достигает долей ома, то рационально использовать повышающий трансформатор.

От измерительной схемы, кроме полезного сигнала, поступают различные помехи в виде отдельных импульсов, напряжения сети, высших гармоник сигнала и т. д.

Учитывая основные характеристики измерительной системы, можно перечислить основные требования, предъявляемые к усилителю.

1. Усилитель должен усиливать переменные напряжения частотой 4 кГц.

2. Усилитель должен иметь коэффициент усиления, равный

$$K = \alpha \frac{U_{\text{ср}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (3)$$

где K — коэффициент усиления усилителя;

α — коэффициент, учитывающий надежность срабатывания фазочувствительного триггера;

$U_{\text{ср}}$ — напряжение срабатывания фазочувствительного триггера;

$U_{\text{вх}}$ — напряжение на входе усилителя, которое он должен чувствовать.

3. Различные помехи, действующие на входе усилителя, не должны вызывать ложных срабатываний. Насыщение усилителя большим сигналом и помехами не должно вызывать заметного сдвига фазы основного сигнала.

4. Усилитель должен быть устойчивым против очень больших перегрузок сигналом.

5. Напряжение сигнала, подаваемое на фазочувствительный триггер, должно быть синусоидальным, что требуется по условию сложения сигнала с опорным напряжением.

6. Напряжение на входе фазочувствительного триггера не должно изменяться больше чем в два раза относительно стартового.

При разработке схемы усилителя были учтены все эти основные требования. Блок-схема усилителя представлена на рис. 1.

Избирательный каскад состоит из усилителя, катодного повторителя и избирательной обратной связи.

Первые три каскада усилителя собраны по обычной схеме, а поэтому рассмотрим более подробно ограничитель, частотно-избирательный каскад и фазочувствительный триггер.

На рис. 2 изображена принципиальная схема частотно-избирательного фазочувствительного усилителя, разработанного для автомата по разбраковке постоянных магнитов.

Датчик Холла D подключен к усилителю через согласующий трансформатор Тр-1, что позволило эффективно реализовать выходную мощность последнего. Сопротивление R_2 и емкость C_1 служат для симметрирования датчика с учетом подводящих проводов, а R_1 — для установки рабочего тока датчика. Первые три каскада усилителя выполнены на лампах 6Н2П. Между вторым и третьим каскадами включен ограничитель, выполненный на стабилитроне типа Д-808 по схеме

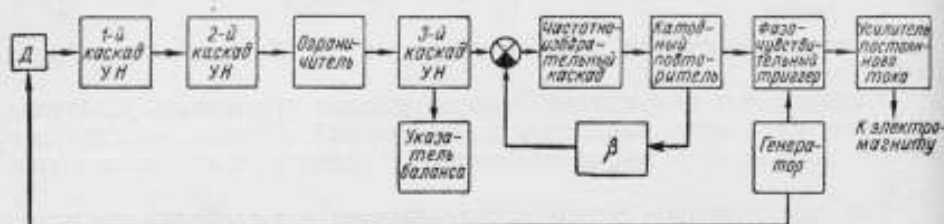


Рис. 1. Блок-схема частотно-избирательного фазочувствительного усилителя.

ограничения прямой проводимостью без подпорного напряжения. Балластное сопротивление R_3 выбрано равным 330 ком.

Избирательный каскад собран на лампах типа 6Н2П и 6Н3П. Такой выбор ламп избирательного каскада обеспечил нужную для данного усилителя частотную характеристику.

С катодного сопротивления лампы L_3 напряжение подается на фазочувствительный выпрямитель. Опорное напряжение к фазочувстви-

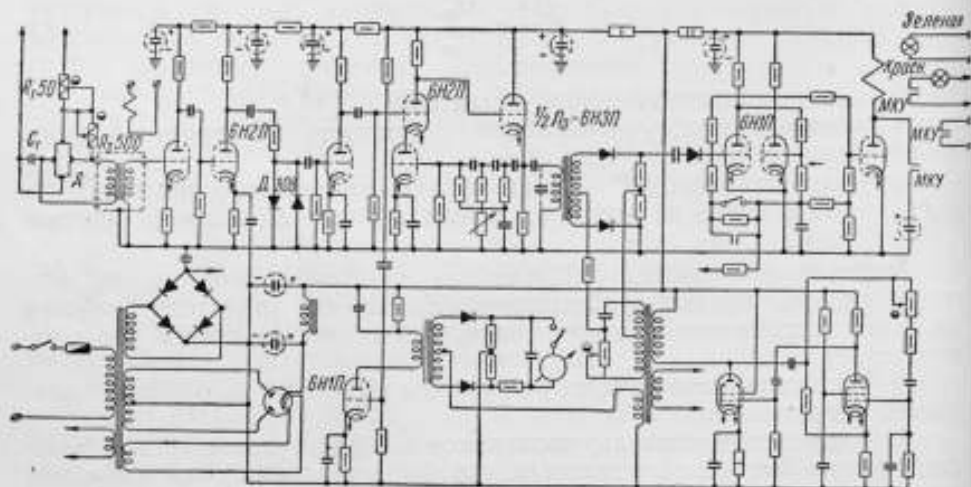


Рис. 2. Принципиальная схема частотно-избирательного фазочувствительного усилителя.

тельному выпрямителю подается с обмотки выходного трансформатора Тр-3. Для регулирования фазы опорного напряжения предусмотрен фазовращатель (R_{48}, C_{30}).

Напряжение с фазочувствительного выпрямителя подается на триггер.

В исходное состояние триггер приводится контактами устройства РСМ-2, которое управляется блоком синхронизации автомата. В исходное состояние триггер можно привести выключателем ВК-3. Перепад напряжения триггера реализуется с помощью лампы L_5 , в аноде

которой включено реле МКУ-48. Это реле воздействует на классифицирующий электромагнит автомата.

Прохождение годного магнита сигнализируется красной лампой, а бракованного — зеленой.

Индикатор для симметрирования магнитной системы собран на лампе 6Н1П, в аноде которой включен фазочувствительный выпрямитель, нагруженный стрелочным указателем.

Описанный частотно-избирательный фазочувствительный усилитель проверен в работе на заводе постоянных магнитов и показал хорошие результаты. Этот усилитель можно использовать для автоматических цифровых приборов и в различных измерительных системах, где требуются помехоустойчивые, избирательные усилители, работающие в режиме очень больших перегрузок с триггерным выходом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сущкевич В. И. (ред.), Ламповые усилители, ч. 2, «Советское радио», 1951.
2. Полонников Д. Е., Электронные усилители автоматических компенсаторов, Госиздат физико-математической литературы, 1960.
3. Кочинев Ю. Г., К расчету частотно-избирательных усилителей низкой частоты, Госэнергоиздат, «Электричество», № 4, 1954.
4. Носов Ю. Р., Полупроводниковый источник образцового (опорного) напряжения, «Измерительная техника», № 3, 1960.

А. В. МИТКЕВИЧ, Е. Г. ШРАМКОВ

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В статье приведен перечень основных требований, предъявляемых к магнитометрам для исследования стабильности и определения температурного коэффициента магнитных систем с постоянными магнитами, и дано описание нескольких типов магнитометров, разработанных и исследованных авторами.

Общими требованиями, предъявляемыми к магнитометрам при исследовании стабильности магнитных систем и определении их температурного коэффициента, являются:

1) Высокая точность измерения изменения магнитной индукции в зазоре исследуемой магнитной системы, необходимая при испытании систем для приборов класса 0,1 и 0,2. Погрешность не должна превышать 0,01—0,03%.

2) Повторяемость результатов измерений при проведении испытаний десятков и даже сотен систем в течение длительных промежутков времени.

3) Относительно малый собственный температурный коэффициент магнитометра, что уменьшает погрешность и упрощает определение температурного коэффициента системы.

4) Простота и достаточная быстрота производства каждого отдельного измерения, которая должна позволить выполнять серийные испытания большого числа магнитных систем. Достаточно быстрые измерения позволяют, кроме того, определять зависимость магнитной индукции в зазоре системы от температуры при ее плавном изменении без длительных выдержек времени при различных температурах (что значительно труднее выполнить).

В процессе работы было осуществлено и исследовано несколько типов магнитометров.

Весовой магнитометр, основанный на принципе неуравновешенных весов, уравновешивание которых осуществляется с помощью тока в рамке, находящейся в зазоре магнитной системы, применялся еще Найтом [1]. Конструкция этого магнитометра, разработанная заводом «Вибратор», была после подробного исследования переработана и улучшена авторами [2]. Погрешность измерений, выполняемых посредством этого магнитометра, оценивалась примерно в 0,03%. С помощью весового магнитометра было проведено испытание 120 систем с магни-

тами из сплавов магнито и альнико с промежутками времени, между испытаниями, доходившими до четырех лет (в известной степени это характеризует прибор с положительной стороны). Однако необходимо отметить, что производство каждого измерения при помощи весового магнитометра требует значительной затраты времени (в лучшем случае около получаса). Кроме того, весовой магнитометр обладает сравнительно большим собственным температурным коэффициентом. Недостатком является также и то, что его погрешность может резко увеличиться при малейшем смещении положения осей на подпятниках.

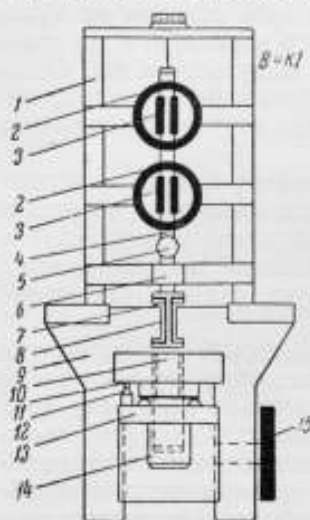
Магнитометр с качающейся рамкой основан на нулевом баллистическом методе измерения магнитного потока, т. е. на сравнении двух направленных навстречу друг другу импульсов э. д. с. Один из них возникает в измерительной рамке при ее удалении из воздушного зазора исследуемой системы, а другой может быть получен различными методами.

В работе Тенцера [3] компенсация исследуемого импульса осуществлялась с помощью одной катушки взаимной индуктивности, в первичной обмотке которой изменялся ток, при этом импульсы (измеряемый и возникающий во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности) весьма сильно отличаются по форме друг от друга, что затрудняет работу нулевого указателя.

Авторами были применены две катушки взаимной индуктивности с различными постоянными времени их первичных обмоток. Вторичные обмотки этих катушек были включены последовательно навстречу друг другу. Измеряемый импульс компенсировался разностью двух импульсов вторичных обмоток этих катушек, возникающих при замыкании коротко первичных обмоток. Изменяя постоянные времени первичных обмоток катушек взаимной индуктивности, можно было в известных пределах изменять форму компенсирующего импульса. Это позволило добиться лучшей компенсации измеряемого импульса и несколько улучшило условия работы нулевого указателя. Погрешность измерений в этом случае была 0,02—0,03%. Применение этого магнитометра сопряжено с некоторыми трудностями, основная из которых — затрата сравнительно большого количества времени при подборе тока в первичных обмотках катушек взаимной индуктивности и его измерении компенсатором, причем в этом случае необходимо проверять нулевое положение нулевого указателя и компенсацию импульсов. В связи с этим было признано целесообразным проводить серийные испытания магнитных систем с помощью более простого и надежного, с точки зрения производства измерения, электродинамического магнитометра, описанного ниже. Однако магнитометр с качающейся рамкой весьма вероятно может оказаться полезным для измерений магнитной индукции там, где электродинамический магнитометр не может быть использован, например, для исследования магнитных систем с нерадикальным магнитным полем или в случае испытания отдельных магнитов.

Электродинамический магнитометр, разработанный авторами и Н. Б. Ковалевым на кафедре электроизмерительной техники Ленинградского политехнического института им. М. И. Калинина, был переработан и значительно усовершенствован А. В. Миткевич. Этот магнитометр основан на уравнивании моментов, создаваемых, с одной стороны, астатическим электродинамическим измерительным механизмом и, с другой, — взаимодействием тока в рамке с магнитным потоком исследуемой магнитной системы. Оба момента действуют на одну и ту же подвижную часть и направлены навстречу друг другу. При равенстве двух моментов или при отсутствии тока прибор находится в нулевом положении.

Схематическое устройство магнитометра представлено на рисунке. Массивные латунные стойки 1 закреплены на литом дюралюминиевом кронштейне 9. На стойках при помощи винтов крепятся четыре неподвижные катушки 2, по две с каждой стороны стоек. На подвесе укреплен сплошная сквозная ось 4 из дюралюминиевой трубки. На оси закреплены четыре подвижные катушки 3, зеркало 5 и измерительная катушка 7 на медном каркасе 8, обеспечивающем успокоение подвижной части. Четыре неподвижные и четыре подвижные катушки образуют аstaticкую систему с результирующим электродинамическим моментом. Взаимодействие тока, протекающего в измерительной катушке 7, помещенной в воздушный зазор 10 исследуемой магнитной системы 11, и магнитного потока этой системы создает второй вращающий момент (который можно назвать магнитоэлектрическим), направленный навстречу электродинамическому.



Схематическое устройство электродинамического магнитометра.

Магнитная система 11 прикрепляется при помощи натяжной гайки 14 к массивному столу 13. Установка системы в одном и том же положении обеспечивается фиксатором — шпилькой 12. При помощи рукоятки 15, вращающей ходовой винт, столик с установленной магнитной системой перемещается вверх до упора, при этом измерительная катушка погружается в воздушный зазор магнитной системы, имея возможность свободно поворачиваться на подвесе.

Ниже зеркала 5 на стойке укреплено неподвижное зеркало 6. В зрительную трубу можно видеть одно над другим два отражения от двух зеркал 5 и 6 одной и той же шкалы, установленной у зрительной трубы. Перед каждым наблюдением подвижная часть устанавливается в таком положении, чтобы цифры на шкалах находились на одной прямой. При таком устройстве небольшие изменения положения шкалы, конструктивно не связанной с магнитометром, не вызывают изменения относительного расположения указанных выше отражений.

Электродинамический момент при последовательном соединении подвижных и неподвижных катушек пропорционален квадрату тока I в катушках

$$M_{эд} = K_1 I^2.$$

Магнитоэлектрический момент, создаваемый взаимодействием тока в измерительной катушке, включенной последовательно с катушками электродинамического механизма, и магнитного потока в воздушном зазоре магнитной системы, пропорционален произведению магнитной индукции B в зазоре системы и тока в этой катушке

$$M_{мэ} = K_2 w B I,$$

где K_1 и K_2 — постоянные, зависящие от конструкции прибора; w — число витков измерительной катушки.

При равенстве двух моментов, действующих на подвижную часть,

$$K_1 I^2 = K_2 w B I,$$

откуда

$$B = \frac{K_1}{K_2 w} I$$

или

$$B = K_3 I,$$

где

$$K_3 = \frac{K_1}{K_2 \omega}.$$

Таким образом, магнитная индукция в зазоре исследуемой системы пропорциональна току в положении равновесия магнитометра. Измеряя компенсатором ток, мы тем самым измеряем в условных единицах магнитную индукцию.

Дадим некоторое приращение току при равновесии, т. е. при нулевом положении, равное ηI , где $\eta \ll 1$, и определим избыточный вращающий момент ΔM , который будет отклонять подвижную часть от положения равновесия.

$$\begin{aligned} \Delta M &= K_1 (I + \eta I)^2 - K_2 \omega B (I + \eta I) = \\ &= K_1 I^2 + 2K_1 \eta I^2 + K_1 \eta^2 I^2 - K_2 \omega IB - K_2 \omega \eta IB. \end{aligned}$$

Так как при равновесии

$$K_1 I^2 - K_2 \omega BI = 0$$

и членом с η^2 мы можем пренебречь, ибо по условию $\eta \ll 1$, то

$$\Delta M = K_1 \eta I^2.$$

При небольшом отклонении от положения равновесия угол отклонения α пропорционален моменту ΔM или $\alpha = K_4 \Delta M$, где K_4 — коэффициент, определяемый свойствами подвеса.

Учитывая, что из условий равновесия

$$I = \frac{K_2}{K_1} \omega B,$$

можно написать:

$$\alpha = K_4 \Delta M = K_4 K_1 \eta I^2 = K_4 \frac{K_2^2}{K_1} \eta \omega^2 B^2 = K \eta \omega^2 B^2,$$

$$K_4 \frac{K_2^2}{K_1} = K.$$

Следовательно, отклонение подвижной части от положения равновесия будет пропорционально квадрату тока или произведению из квадрата числа витков и квадрата измеряемой магнитной индукции.

Повышение чувствительности магнитометра ограничивается тем, что увеличение числа витков ω в n раз вызывает необходимость повышения тока I также в n раз, как это следует из условия равновесия. При неизменной магнитной индукции B магнитоэлектрический вращающий момент возрастает при этом в n^2 раз.

Увеличение вращающего момента полезно, так как повышает качество прибора и позволяет меньше считаться с возможным засорением воздушного зазора магнитных систем.

С другой стороны, регулирование точного расположения измерительной катушки относительно центра системы производится для какой-нибудь одной из исследуемых систем. А так как системы не идентичны, то для некоторых из них центральное положение измерительной катушки может быть немного нарушено, в результате чего возникает сила, пропорциональная току в измерительной катушке, прижимающая ее к боковой стенке воздушного зазора, что может вызвать пока-

чивание рамки и даже затирание магнитометра. Таким образом, ток в измерительной катушке, независимо от соображений, связанных с нагреванием катушек, должен быть достаточно малым, чтобы обеспечить испытания большого числа магнитных систем без дополнительного регулирования магнитометра.

При испытании магнитных систем различных конфигураций с магнитами из сплавов альнико и магнико с присадкой титана число витков измерительной катушки изменялось в пределах от 1 до 8, причем ток при равновесии изменялся от 70 до 110 ма. Цена 1 мм шкалы магнитометра при этом изменялась в пределах 0,005—0,015% от измеряемой величины. Соответственно погрешность, связанную с недостаточно точной установкой на нуль и смещением нулевого положения в процессе измерения, можно было принять $\gamma_1 = 0,001—0,003\%$.

Температура в помещении, в котором находились магнитометры и нормальный элемент компенсатора, поддерживалась равной $(22 \pm 0,1)^\circ\text{C}$. Погрешность, обусловленная изменением температуры на $0,1^\circ\text{C}$, в основном определялась погрешностью, вызываемой изменением температуры магнитной системы, и оценивалась величиной $\gamma_2 = 0,002—0,005\%$, так как погрешностью, возникающей при изменении температуры нормального элемента на $0,1^\circ\text{C}$, можно было пренебречь, а температурная погрешность самого магнитометра, как показал опыт, была также пренебрежимо мала.

Для уменьшения погрешности, связанной с установкой исследуемой системы в магнитометре, измерительная катушка изготовлялась обычно в 2—3 раза длиннее полюсных наконечников, и тогда смещение столика с магнитной системой вниз на 0,5 мм уже не вызывало заметного изменения показаний прибора. Это указывало и на отсутствие влияния магнитного поля системы на электродинамический механизм. Установка на фиксаторе, ограничивающем поворот магнитных систем, также осуществлялась достаточно надежно, так как при завинчивании натяжной гайки фиксатор всегда прижимался к одной и той же боковой стенке фиксирующего отверстия; поэтому погрешность, возникающая при замене магнитных систем в магнитометре, могла быть принята $\gamma_3 = 0,003\%$. Ток измерялся компенсатором с погрешностью порядка $\gamma_4 = 0,004\%$.

Таким образом, суммарная погрешность электродинамического магнитометра при поддержании температуры в помещении, в котором находится магнитометр и нормальный элемент, с погрешностью до $0,1^\circ\text{C}$ может быть принята $\gamma = 0,01—0,015\%$.

В случае же поддержания температуры с погрешностью до $0,2^\circ\text{C}$ погрешность увеличится, соответственно, до $\gamma' = 0,012—0,02\%$.

Нижний предел погрешности при этом относится к случаю, когда ток в магнитометре соответствует его наибольшей чувствительности.

Необходимо отметить особый случай испытания магнитных систем с керамиковыми магнитами, имеющими температурный коэффициент 2% на 10°C и сравнительно небольшую магнитную индукцию, когда погрешность достигает величины

$$\gamma'' = 0,03—0,04\%.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Knight S. F., Proc. Inst. Elect. Engrs., p. II, 96, 635, 1949.
2. Шрамков Е. Г., Миткевич А. В., Ковалев Н. Б., Труды ЛПИ, № 184, 1956, стр. 222.
3. Tenzer R. K., Archiv für Elektrotechnik*, Bd. 40, H. 7, 1952, S. 406.

П. П. МАРКИН, И. И. ПЕККЕР

ФЕРРОТЕСТЕР ДЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В статье приводится описание прибора, предназначенного для получения на экране электронного осциллографа предельного и частного циклов гистерезиса магнитотвердых материалов при намагничивании током очень низкой частоты (0,5—1 гц).

Создание аппаратуры, позволяющей с минимальной затратой труда и времени получать характеристики магнитных материалов, является в настоящее время актуальной задачей. Подобная аппаратура может найти применение как при производстве постоянных магнитов, так и при их исследовании.

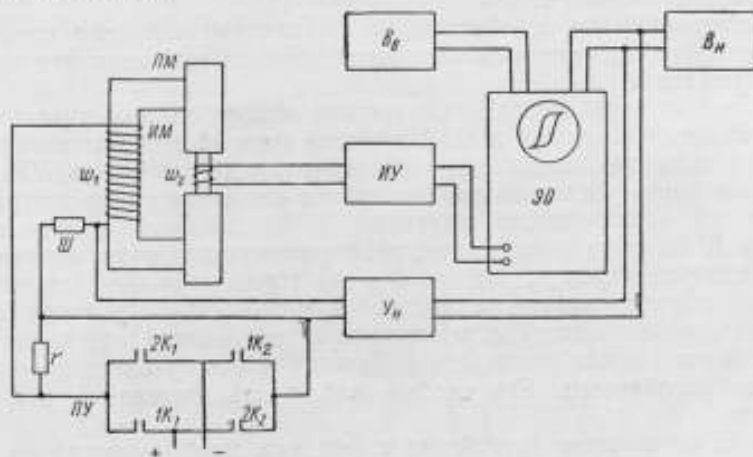


Рис. 1. Блок-схема установки.

При измерении параметров постоянных магнитов существенный интерес представляет кривая предельного гистерезисного цикла. Наиболее распространенный метод ее определения — баллистический. Он обеспечивает относительно высокую точность измерения, но является весьма трудоемким, поэтому в производственных условиях для массового контроля постоянных магнитов мало применим.

В данной работе приводится описание ферротестера, предназначенного для получения как предельного, так и частных циклов гистерезиса материала постоянных магнитов путем перемангничивания током очень

низкой частоты, порядка $(0,5-1)$ гц. Изображение петли гистерезиса фиксируется на экране электронного осциллографа.

Ферротестер значительно облегчит массовый контроль постоянных магнитов, ускорит исследовательскую работу по усовершенствованию технологических режимов и создание новых магнитных материалов. Каждую партию постоянных магнитов можно будет снабдить реальной характеристикой размагничивания. Это значительно облегчит рациональное использование постоянных магнитов, позволит более правильно вести конструирование устройств с постоянными магнитами.

Как видно из блок-схемы (рис. 1), установка состоит из пермеаметра $ПМ$, переключающего устройства $ПУ$, электронного устройства, куда входят интегрирующий усилитель $ИУ$, усилитель горизонтального отклонения $УН$ и два пиковых вольтметра $ВВ$ и $ВН$, и электронного осциллографа $ЭО$ типа ЭНО-1, имеющего трубку с большим временем послесвечения.

Испытуемый магнит $ИМ$ помещается между полюсами пермеаметра $ПМ$, намагничивающая обмотка которого питается от сети постоянного тока через контакты переключающего устройства $ПУ$. Последнее представляет собой контактор типа КП, к которому добавлены две пары контактов.

При замыкании контактов $1К_1$ и $1К_2$ ток в обмотке пермеаметра имеет одно направление, а при замыкании контактов $2К_1$ и $2К_2$ — противоположное. Обмотка контактора питается от сети постоянного тока через контакт электронного реле времени.

Параллельно обмотке включено сопротивление r , которое облегчает работу контактов при размыкании цепи, предотвращая появление перенапряжений. Оно также обеспечивает плавное и единообразное спадание тока при коммутации, что способствует получению более четкого изображения гистерезисного цикла.

Последовательно с обмоткой пермеаметра включено сопротивление, с которого снимается сигнал, пропорциональный величине намагничивающего тока.

На испытуемый постоянный магнит наносится измерительная обмотка. Э. д. с., наводимая в этой обмотке (при изменении потока в постоянном магните), подается на интегрирующий усилитель $ИУ$, сигнал с которого через усилитель вертикального отклонения осциллографа поступает на отклоняющие пластины и на пиковый вольтметр $ВВ$. С шунта $Ш$ падение напряжения, пропорциональное намагничивающему току, подается через усилитель $УН$ на горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа и на пиковый вольтметр $ВН$. Несмотря на сравнительно низкую частоту перемагничивания (около 1 гц) изображение гистерезисного цикла на экране осциллографа получается сплошным и довольно устойчивым. Его удобно наблюдать визуально и фотографировать.

Схема питающего устройства имеет вид, изображенный на рис. 2. Частота переключения выбрана около 1 гц. При такой низкой частоте потери на вихревые токи ничтожно малы и ими можно пренебречь.

При частоте ниже 1 гц луч на экране осциллографа в точках H_{max} и B_{max} смещается либо вверх, либо вниз, что искажает петлю гистерезиса. При частоте выше 1 гц образец не успевает перемагничиваться за счет большой постоянной времени пермеаметра.

Реле времени, включенное в обмотку контактора ω_k , представляет собой два каскада на лампе типа 6Н1П; в анодные цепи включены обмотки реле $1P$ и $2P$ типа МКУ-48, рассчитанные на напряжение 220 в. Частоту переключения в некоторых пределах можно изменять путем изменения постоянной времени сеточной цепи. Реле времени позволяет

также подобрать время замыкания и размыкания контактов, т. е. обеспечить соответствующее нарастание и спад тока в пермеамetre.

Электронное устройство представляет собой отдельный блок, питаемый от сети переменного тока частотой 50 гц.

Электронное устройство можно подключить к любому другому пермеаметру с соответствующим переключающим устройством, дающим изменение тока с частотой около 1 гц.

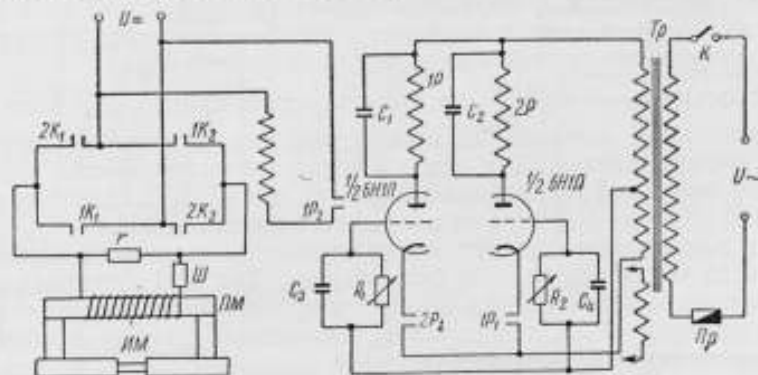


Рис. 2. Схема питающего устройства.

Функциональная схема прибора представлена на рис. 3, а полная — на рис. 4. Падение напряжения с безреактивного сопротивления в цепи намагничивающей катушки пермеаметра подается на вход *H*. Оттуда напряжение через переключатель чувствительности (входной аттенюатор) подается на усилитель канала *H*.

С помощью переключателя чувствительности устанавливается нужный размах изображения на экране.



Рис. 3. Функциональная схема прибора.

Усилитель канала *H* усиливает напряжение до величины, удобной для рассмотрения. В усилителе имеются ручки плавного регулирования чувствительности и смещения луча по горизонтали, а также ручки коррекции нуля усилителя постоянного тока. Выход усилителя гальванически связан с горизонтально отклоняющими пластинами электронно-лучевой трубки и пиковым вольтметром. Отсчет максимального значения *H* производится по стрелочному прибору типа М-24.

Питание усилителя осуществляется от нестабилизированного источника напряжением 400 в, причем на выходном каскаде, последовательно включенном с предыдущим, падает примерно 270 в.

Таким образом, для питания предварительных каскадов усилителя используется напряжение 150 в, которое стабилизировано газовым стабилизатором СГАС (лампа L_2).

С анодов ламп усиленный сигнал подводится к клеммам «Выход Н», которые соединяются с горизонтальными отклоняющими пластинами электронно-лучевой трубки осциллографа. Одновременно с клемм «Выход Н» напряжение подается на пиковый вольтметр V_H .

Поскольку $e_2 = -\omega_2 S \frac{dB}{dt}$, то для получения кривых индукции э. д. с. с измерительной катушки должна подаваться к осциллографу через интегрирующий контур. Для этого в электронном устройстве вмонтирована интегрирующий усилитель на лампе L_1 типа 6Н2П. Э. д. с. e_2 с измерительной обмотки подается на вход левого триода 6Н2П.

Для расширения верхнего конца частотного диапазона сопротивление выхода усилителя должно быть малым. Для этой цели выход интегрирующего каскада соединен со входом катодного повторителя, собранного на правом триоде лампы 6Н2П. Вследствие низкой частоты связь между каскадами гальваническая.

Как известно, погрешность интегрирования с уменьшением частоты увеличивается, а погрешность дифференцирования — уменьшается.

$$\gamma_{\text{ин}} = \frac{1}{80} \left(\frac{T}{\tau_0} \right)^2; \quad \gamma_{\text{д}} = 20 \left(\frac{\tau_0}{T} \right)^2.$$

Поэтому в усилителе интегрирование в прямом канале заменено дифференцированием в канале отрицательной обратной связи. Элементами дифференцирующей цепочки являются $C_9 R_{47}$ (рис. 4). Напряжение с выхода усилителя, т. е. с сопротивления R_{51} , через C_9 подается на его вход.

Клеммы «Вход В» выведены на переднюю панель электронного устройства. Клеммы «Выход В» соединяются со входом вертикального усилителя осциллографа, причем ручка режима работы ставится в положение «Постоянный ток», входное сопротивление 0,5 Мом.

Для более точной установки масштаба с вертикальных отклоняющих пластин напряжение подается на электронный пиковый вольтметр, собранный на лампе 6Н1П. Сопротивление R_{59} служит для установки стрелки измерителя на нуль. Электронный осциллограф типа ЭНО-1 применяется без какой-либо переделки.

Как отмечалось выше, напряжение, пропорциональное магнитной индукции, снимается с измерительной катушки, помещенной на испытуемый образец.

Чтобы э. д. с. при испытании магнитов разного сечения зависела только от магнитной индукции, необходимо произведение числа витков на сечение образца сделать постоянной величиной. Желательно число витков иметь малым, что упрощает выполнение самой обмотки и уменьшает погрешность. Но в этом случае для получения достаточного изображения на экране осциллографа необходимо применить усилителя, имеющие сравнительно большой коэффициент усиления, что значительно усложнило бы электронный блок.

С другой стороны, желательно число витков иметь по возможности большим, чтобы произведение $\omega_2 S$ было достаточно близким к градуировочному коэффициенту K для различных сечений образцов.

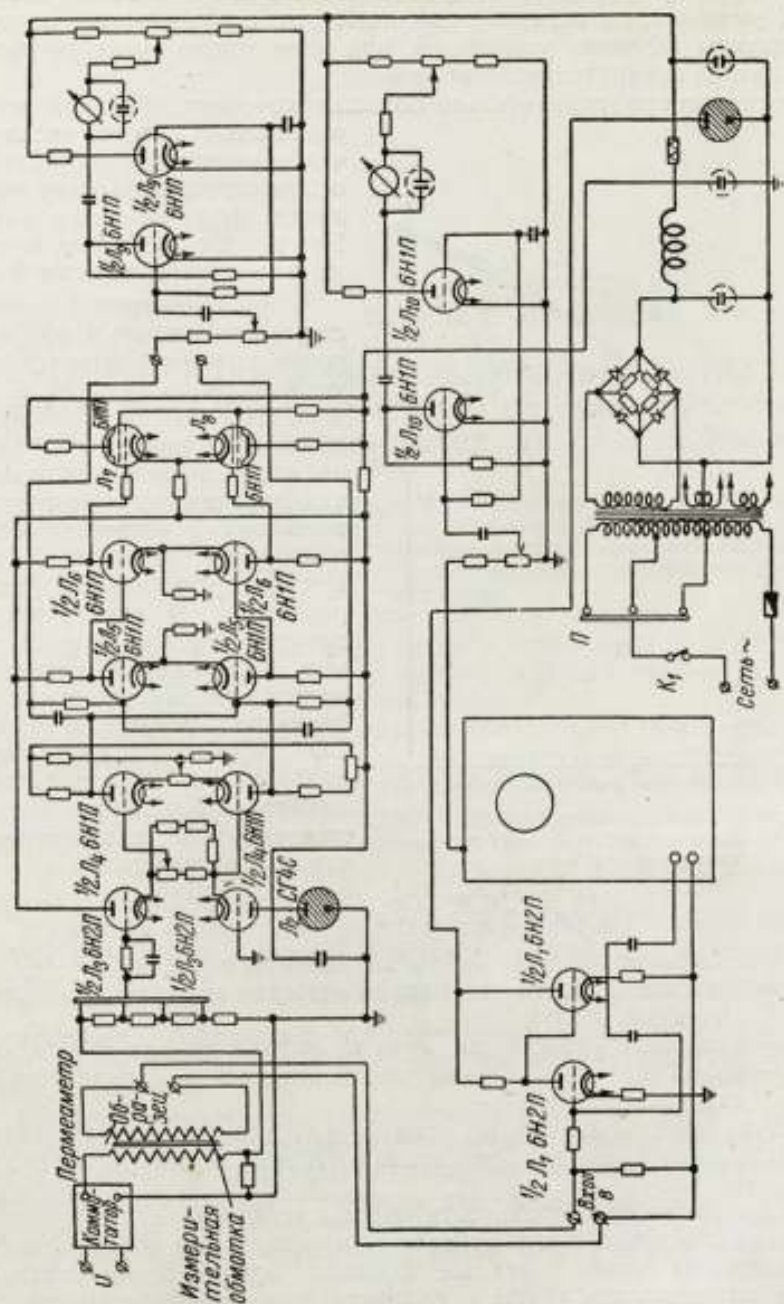


Рис. 4. Полная схема прибора.

Учитывая указанные обстоятельства, коэффициент K выбран равным 800. При сечении образца $S = 4 \text{ см}^2$ необходимо намотать на него 200 витков.

Очевидно, при испытании образцов малого сечения можно коэффициент K уменьшить в определенное число раз, если, конечно, позволят коэффициенты усиления усилителей, при этом можно будет уменьшить и число витков измерительной катушки.

Аналогично при сравнительно больших сечениях образцов можно увеличить K в целое число раз, чтобы уменьшить погрешность, получающуюся за счет округления дробного числа витков. При этом, естественно, изменяют и масштабы по осям B и H .

При градуировке ферротестера, так же как и при измерении, коэффициенты усиления усилителей по каналам B и H должны иметь вполне определенное значение. Для этого на вход подается определенная величина переменного напряжения с частотой 1 гц и отмечается отклонение луча как по вертикали, так и по горизонтали. В случае необходимости градуировочный размер изображения устанавливается при помощи ручек усиления по вертикали и горизонтали. Чувствительность вертикального и горизонтального каналов определялась как чувствительность к напряженности магнитного поля.

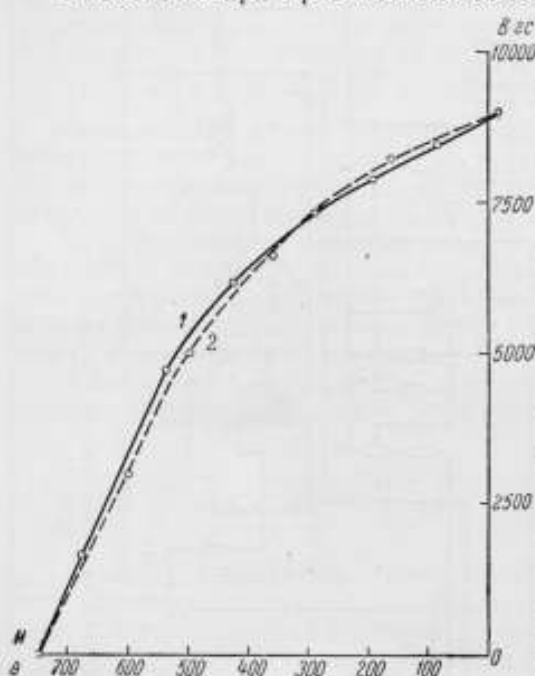


Рис. 5. Кривые размагничивания:
1 — сняты на баллистической установке; 2 — сняты с экрана осциллографа.

$$S_H = \frac{I_H n_H}{H}; \quad S_B = \frac{I_B n_B}{H}.$$

где H — известная напряженность магнитного поля, э;
 S_H и S_B — чувствительности к напряженности магнитного поля и индукции, дел/э;

I_H ; I_B — величины отклонения луча на экране по оси B и H , дел.;
 n_H , n_B — коэффициенты деления вертикального и горизонтального входов.

Градуировочные кривые по осям B и H показывают, что зависимости отклонения лучей по горизонтали от H и по вертикали от B практически линейны.

Для определения стабильности работы установки и повторяемости результатов измерений были проведены многократные определения петель гистерезиса одних и тех же образцов, причем петли указанных образцов определялись также и баллистическим методом. Результаты испытаний показали, что вероятная погрешность измерения не превышает 5%. Совпадение петель гистерезиса, снятых на баллистической установке и с помощью ферротестера, получается достаточно хорошим (рис. 5).

Е. Т. ЧЕРНЫШЕВ, Е. Н. ЧЕЧУРИНА,
Н. Г. ЧЕРНЫШЕВА, И. А. ОРАЛОВА

РАБОТЫ ВНИИМ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ МЕТОДИКИ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НОРМАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

В статье дано описание аппаратуры и соответствующей методики измерений, разработанной во ВНИИМ для аттестации нормальных образцов ферромагнитных материалов на переменном токе в диапазоне частот от 50 гц до 1 Мгц и при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями.

Испытание магнитных материалов в переменных полях становится все более распространенным и требует выпуска специализированной аппаратуры и нормативной документации.

ГОСТ 802—58 впервые предусмотрено определение зависимости B от H в переменных полях, правда без достаточной определенности.

До сего времени необходимые характеристики материалов определяются многими организациями на нестандартной аппаратуре, в большинстве случаев собственного производства. Важность этих испытаний, так настойчиво пробивающих себе путь, требует их стандартизации и выпуска унифицированной аппаратуры.

В качестве основной характеристики магнитных материалов в переменных полях мы выбираем комплексную магнитную проницаемость $\mu = \frac{B}{H} = \mu_1 + j\mu_2$, исходя из следующих соображений: во-первых, эта характеристика аналогична проницаемости в постоянных магнитных полях, а, во-вторых, она удобна для проведения расчетов магнитных цепей.

Следует отметить, что, строго говоря, эта характеристика не может быть применена для большинства случаев намагничивания, так как либо индукция, либо напряженность магнитного поля не синусоидальны. В этом случае приходится говорить либо об эквивалентных синусоидах для величин B и H , либо о первых гармониках для этих же величин. Имея в виду наличие угла сдвига фаз ψ между B и H , получим окончательное выражение для μ

$$\mu = \mu e^{-j\psi},$$

где

$$\mu = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}, \quad \operatorname{tg} \psi = \frac{\mu_2}{\mu_1}.$$

Здесь μ — есть частное от деления амплитудных значений B и H для эквивалентных синусоид*; ψ — угол потерь.

Если заменить искаженные кривые первыми гармоническими, то модуль проницаемости будет равен

$$\mu_1 = \frac{B_{1\max}}{H_{1\max}}.$$

Таким образом, определение комплексной проницаемости сводится к определению ее модуля, либо в виде $\mu = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$, либо $\mu_1 = \frac{B_{1\max}}{H_{1\max}}$. Что же касается потерь, то между величиной ψ и собственно потерями для кольцевого образца существует однозначная зависимость в соответствии с равенствами

$$p = I^2 r_p = k_1 B_{1\max} \cdot H_{1\max} \cos \psi = k_2 \lg \psi I^2 \mu_1,$$

где r_p — сопротивление потерь;

I — сила намагничивающего тока;

k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от размеров образца, чисел витков обмоток и частоты намагничивающего тока.

Возможности измерения величин μ и μ_1 и должна служить разрабатываемая аппаратура.

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии работу по методике измерений на переменном токе начал еще до войны (в то время она велась весьма немногими организациями, в частности ленинградским заводом «Красная заря»). К 1941 г. были изготовлены первые во ВНИИМ мосты резонансного типа и по схеме Овена. Исследованию этих мостов посвящены отчеты лаборатории за 1938 и 1940 гг.

Все же можно считать, что в СССР к 1944 г. отсутствовали как разработанная методика измерений, так и промышленно выпускаемая аппаратура.

Весьма важным нововведением предвоенных лет явилось предложение применить для измерения максимальных значений магнитных величин вольтметр, показывающий средние значения напряжений. Такой способ был предложен с одной стороны фирмой Сименс (вольтметр с механическим выпрямителем), а с другой, — американской фирмой (с электронным выпрямителем) [1].

Начиная с 1945 г. магнитная лаборатория ВНИИМ развернула достаточно широко работы по созданию советской магнитоизмерительной аппаратуры. В это же время аналогичные работы начали вести Центральная лаборатория автоматизации и Московский энергетический институт.

За первые пять послевоенных лет ВНИИМ была разработана полностью и комплектно аппаратура для измерений на постоянном токе (слабые, средние и сильные поля), которая сейчас (после конструктивной переработки) выпускается заводом «Точэлектроприбор».

ВНИИМ был воспроизведен феррометр Сименса, создана малогабаритная ваттметровая установка. Лабораторией был разработан мост для диапазона частот до 20 000 гц и создана комбинированная установка, позволяющая определять основную кривую намагничивания $B_{\max} = f(H_{\max})$, кривую $B_{\max} = f(H_{1\max})$ и кривую зависимости потерь в функции индукции на частоте 50 гц. Аналогичные приборы были позднее выпущены заводом «Точэлектроприбор» под марками У-520 и У-55.

* Считая их эквивалентными по максимальным значениям.

Кроме того, магнитной лабораторией ВНИИМ был выпущен ряд модификаций вольтметров для измерения средних значений напряжений. Таким образом к 1953 г. были созданы все необходимые предпосылки для начала создания современной магнитоизмерительной аппаратуры, необходимой для аттестации нормальных образцов и обеспечения поверочной деятельности.

Здесь мы считаем уместным более подробно обратить внимание на современное состояние магнитоизмерительной аппаратуры ВНИИМ.

Установка УМИПТ-1

Установка УМИПТ-1 предназначена для испытания нормальных образцов на переменном токе частотой от 50 гц до 10 кгц, а также при одновременном намагничивании в постоянном и переменном полях.

Установка позволяет производить испытание магнитномягких материалов на кольцевых образцах и на полосовых — в приборах Эпштейна.

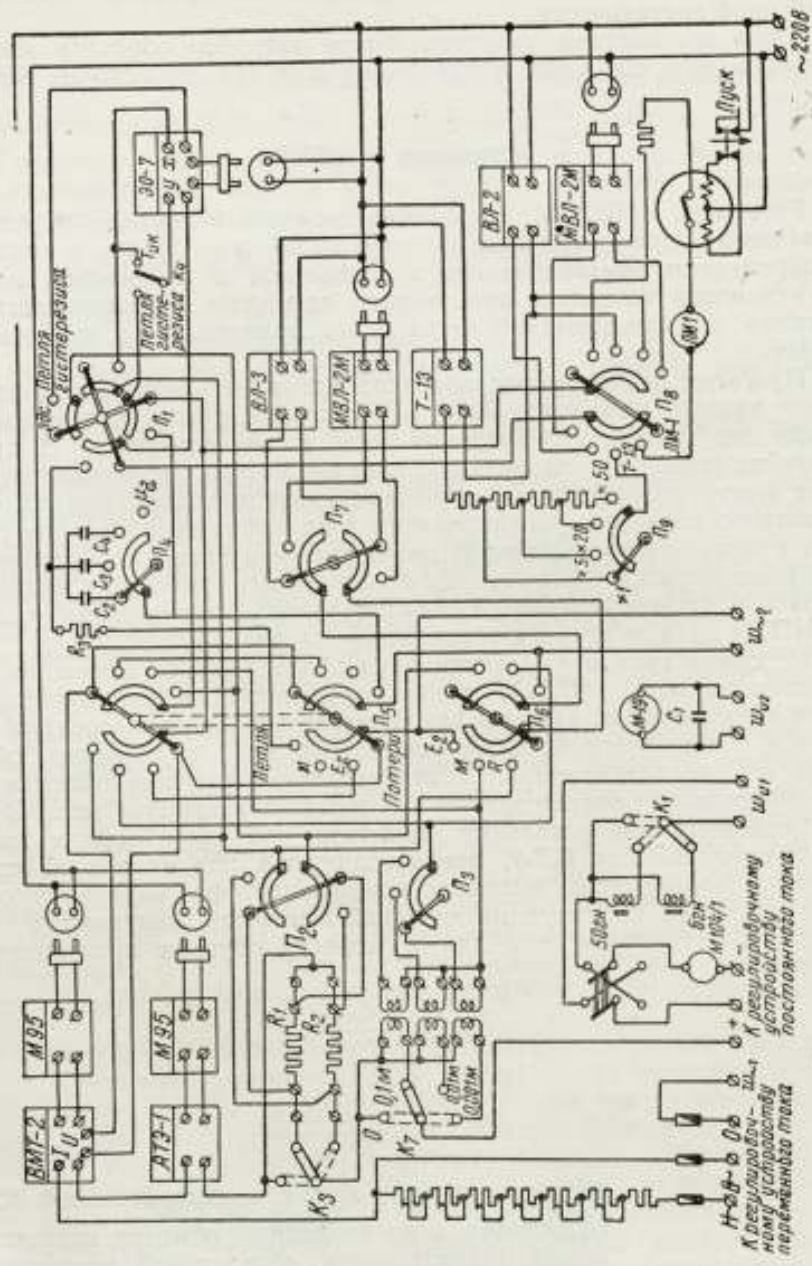
При этом на кольцевых образцах могут быть определены динамические кривые намагничивания в различных режимах и суммарные потери на гистерезис, вихревые токи и последствие. В приборе Эпштейна определяются преимущественно потери. Испытания на установке могут производиться в режиме синусоидальной напряженности магнитного поля (при регулировании тока с помощью системы реостатов), в режиме синусоидальной индукции (при питании намагничивающей цепи образца от источника с низкоомным выходным сопротивлением) и в промежуточных режимах. Принципиальная схема установки УМИПТ-1 дана на рис. 1, а общий вид — на рис. 2.

Основная кривая намагничивания образца, представляющая собой зависимость $B_{\max} = f(H_{\max})$, может определяться в динамическом режиме двумя путями. Первый заключается в измерении средних значений э. д. с. в измерительной обмотке на образце и во вторичной обмотке одной из катушек взаимной индуктивности, первичные обмотки которых включаются последовательно в намагничивающую цепь. В качестве основных измерительных приборов при этом служат диодные вольтметры ВЛ-2 и ВЛ-3, предназначенные для измерений средних значений напряжений, имеющих коэффициент формы кривой от 1,11 до 2,5. Подсчет амплитудных значений магнитной индукции и напряженности магнитного поля для кольцевого образца производится по формулам:

$$B_{\max} = \frac{E_{\text{зср}}}{4fS\omega_2}$$

$$H_{\max} = \frac{E_{M\text{ср}}\omega_1}{4fMl_{\text{ср}}}$$

- где $E_{\text{зср}}$ и $E_{M\text{ср}}$ — средние значения э. д. с. в измерительной обмотке на образце и во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности, обладающей постоянной M ;
 S и $l_{\text{ср}}$ — площадь поперечного сечения образца и длина пути магнитного потока в нем;
 ω_2 и ω_1 — числа витков измерительной и намагничивающей обмоток;
 f — частота переменного тока.



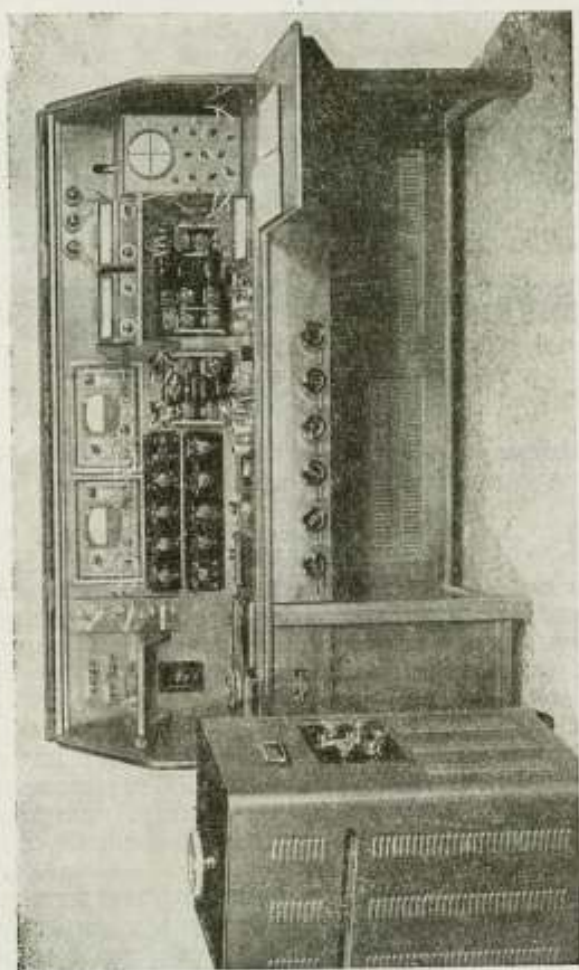


Рис. 2. Общий вид установки УМИПТ-1.

Второй способ определения кривых намагничивания на кольцевых образцах заключается в измерении амплитудного значения падения напряжения ($U_{r\max}$) на образцовом сопротивлении r_1 (или r_2) и измерении среднего значения э. д. с. во вторичной обмотке на образце (E_{2cp}). В качестве измерительных приборов в этом случае служат пиковый вольтметр ВП-1 компенсационного типа (может быть заменен вольтметром типа МВИ-1М)* и вольтметр, измеряющий средние значения напряжений (ВЛ-2, ВЛ-3).

При этом амплитудное значение магнитной индукции подсчитывается по приведенной выше формуле, а амплитудное значение напряженности магнитного поля — по формуле

$$H_{\max} = \frac{U_{r\max} \omega l}{I_{cp} r}$$

Конструкция установки УМИПТ-1 (и усовершенствованного ее варианта — УМИПТ-2) предусматривает возможность, в случае синусоидального характера изменения индукции и напряженности магнитного поля, измерять соответствующие им э. д. с. ламповыми вольтметрами МВЛ-2М, имеющими достаточно чувствительные пределы измерения (10 мА).

Наличие в схеме установки амперметра термоэлектрической системы типа АТЭ-1 с пределами измерений от 0,05 а до 10 а позволяет определять кривые зависимости амплитудных значений индукции от действующих значений напряженности магнитного поля

$$B_{\max} = f(H_d).$$

При одновременном намагничивании испытываемого образца постоянным и переменным полями определяются семейства кривых зависимости вида

$$B_{\max} - B_{\min} = f(H_{\max} - H_{\min}).$$

В последнем случае для измерений используется описанная выше аппаратура, однако, ввиду асимметрии кривых индукции и напряженности поля, подсчеты производятся по уточненным формулам, дающим суммы амплитуд переменных составляющих [2]

$$B_{\Delta} = B_{\max} - B_{\min} \text{ и } H_{\Delta} = H_{\max} - H_{\min}.$$

Определение потерь в образцах ферромагнитных материалов осуществляется на установках УМИПТ-1 и УМИПТ-2 ваттметровым методом, причем в качестве измерительного прибора применяется термоваттметр типа ВМТ-2, имеющий пределы измерения от 0,1 вт до 400 вт при $\cos \varphi = 0,2$.

Наличие в схеме установки электронного осциллографа позволяет производить наблюдение форм кривых намагничивающего тока, э. д. с. e_2 и e_M , гистерезисных кривых и кривых дифференциальной проницаемости по гистерезисному циклу, снятому на переменном токе.

В комплект установки входит милливеберметр, который позволяет производить определение кривых зависимости постоянной составляющей индукции от напряженности постоянного поля при одновременном намагничивании образца в постоянном и переменном полях

$$B_0 = f(H_0).$$

* Приборы типов МВЛ-2М, МВИ-1М и электронный осциллограф ЭО-7 выпускаются заводом «Пунане-Рэт», амперметр М104/1, милливеберметр М119 и термомиллиамперметр Т-13 выпускаются заводом «Вибратор», механический выпрямитель Ц-50 выпускается заводом «Точэлектронприбор». Остальные приборы, входящие в комплект установки, изготавливает завод «Эталон».

Установка УМИПТ-1 обеспечивает определение кривых намагничивания на переменном токе и в условиях сложного намагничивания с погрешностью 4—6%. Потери определяются на установке с погрешностью 3—5%.

Погрешность измерения постоянной составляющей магнитной индукции достигает 7—10% при одновременном наличии сравнимой по амплитуде переменной составляющей магнитной индукции.

Установка УМИПТ-1 в основном предназначена для испытания нормальных образцов, т. е. для метрологических целей. Кроме того, она может быть использована лабораториями научно-исследовательских институтов и конструкторских бюро для испытания ферромагнитных материалов в диапазоне частот от 50 гц до 10 кгц.

В упрощенном и конструктивно-переработанном виде установка может быть широко использована заводскими лабораториями.

Прототипом установки УМИПТ-1 являлась установка УФМ, которая имела специфическое назначение и отличалась от первой тем, что давала возможность определять амплитудные значения четных гармоник магнитной индукции и напряженности поля в схемах простейших магнитных усилителей. Установка УФМ, однако, имела более узкий диапазон использования по частоте, не допускала измерения амплитудных значений намагничивающих токов по падению напряжения на активном сопротивлении r и имела большие размеры (монтаж осуществлялся в двух стендах).

Установка УИММ-2

Для определения характеристик кольцевых образцов ферромагнитных материалов, применяемых для работы в диапазоне сверхзвуковых частот (магнитодиэлектрики, ферриты, листовые материалы тонкого проката) в лаборатории магнитных измерений разработана мостовая установка типа УИММ-2. Принципиальная схема моста дана на рис. 3, а внешний вид — на рис. 4.

Условие равновесия моста установки УИММ-2 при отношении плеч, равном 1:1, имеют вид

$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C} + L_s; \quad r_x = r_s - \frac{1}{\omega C} \operatorname{tg} \delta_C,$$

где L_x — индуктивность обмотки, намотанной на испытываемый образец;

r_x — сопротивление обмотки с сердечником из испытываемого материала;

ω — круговая частота;

C — отсчет по магазину емкостей при уравновешенном мосте;

r_s и L_s — эквивалентные сопротивление и индуктивность магазина сопротивлений;

$\operatorname{tg} \delta_C$ — тангенс угла потерь конденсаторов магазина емкостей.

Диапазон измерений по частоте 20 кгц — 1 Мгц.

Установка позволяет определять зависимость индуктивности (или магнитной проницаемости) и сопротивления потерь обмотки с сердечником из испытуемого материала от напряженности переменного магнитного поля и его частоты.

Измерения индуктивности могут осуществляться в пределах $(2 \cdot 10^{-3} \div 0,5)$ гн (в зависимости от частоты) и сопротивления $1 \div 10\,000$ ом при напряженностях магнитного поля $(0,4 \div 80)$ а/м.

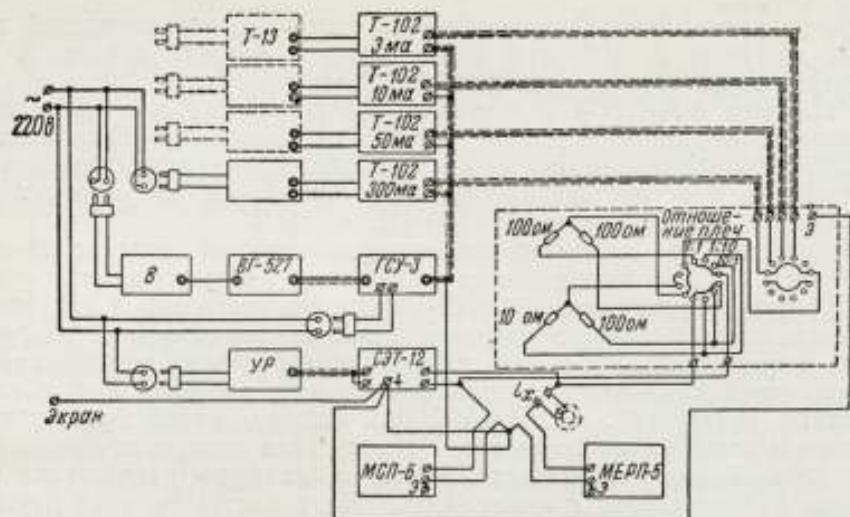


Рис. 3. Принципиальная схема мостовой установки УИММ-2.

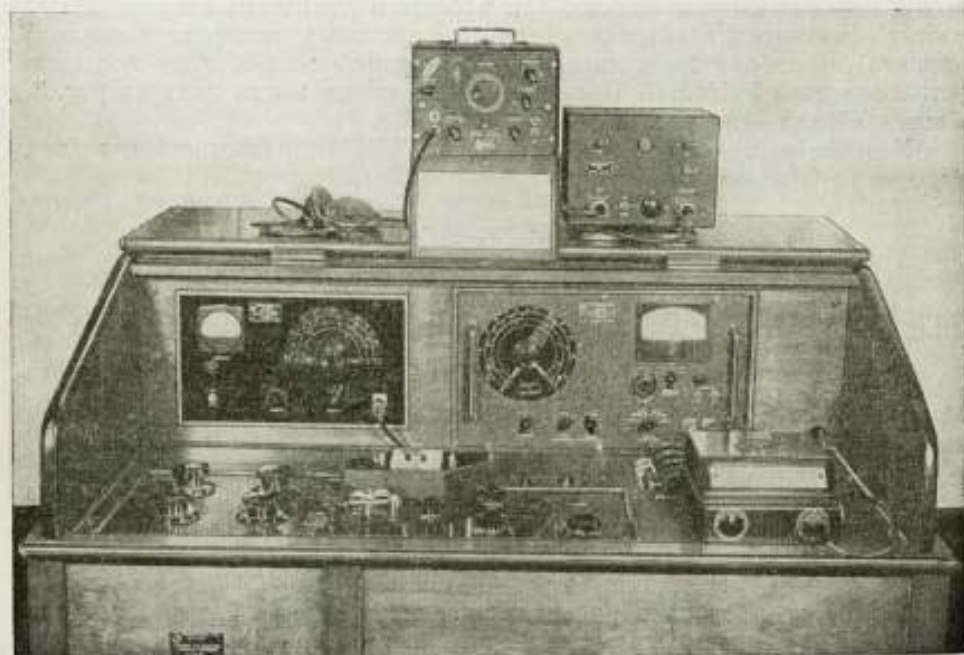


Рис. 4. Общий вид мостовой установки УИММ-2.

Установка дает возможность определять также проницаемость образцов при одновременном намагничивании их постоянным и переменным полями.

Питание установки осуществляется от генератора с диапазоном частот 10—1000 кГц, и регулируемым выходным напряжением до 120 в при мощности порядка 10 Вт. В качестве указателя равновесия применен резонансный усилитель, включенный на выход симметрирующего экранированного трансформатора. Измерение и контроль частоты питающего мост напряжения производятся с помощью гетеродинного волномера. Сила тока в неразветвленной части мостовой схемы измеряется миллиамперметрами термоэлектрической системы. Для расширения пределов измерения по сопротивлению отношение плеч моста сделано переменным. В качестве отношения плеч 1:1 использованы два проволочных сопротивления по 100 Ом, а для отношений плеч 10:1 и 1:10 — керамические сопротивления на 100 и 10 Ом.

Регулируемыми элементами установки являются магазин сопротивлений (с декадами по 1000, 100, 10 и 1 Ом и реохордом на 1,1 Ом) и магазин емкостей (с декадами по 0,1; 0,01 и 0,001 мкФ и переменным воздушным конденсатором на 1100 пФ) *.

На основании результатов измерений параметров магазина емкостей (величина тангенса угла потерь) и магазина сопротивлений (эквивалентная индуктивность) была произведена оценка возможных погрешностей измерений, обусловленных квадратурными составляющими.

Расчет показал, что погрешность в измерении сопротивления потерь обмотки с испытуемым сердечником, вызванная квадратурными составляющими магазина емкостей, не превышает 1% (тангенс угла потерь воздушного конденсатора при частоте 1 МГц не превосходит $5 \cdot 10^{-4}$). Значения эквивалентных индуктивностей магазина сопротивлений могут быть учтены в виде поправочных членов.

Установка в целом была поверена по образцовым катушкам индуктивности и добротности с известными параметрами и зависимостью их от частоты. Расхождение данных, полученных на мостовой установке, с паспортными данными катушек не превышало по индуктивности $\pm 1\%$ и по сопротивлению $\pm 5\%$.

По измеренным величинам индуктивности и сопротивления обмоток с сердечником из испытуемого материала подсчитываются магнитная проницаемость и тангенс угла потерь в зависимости от величины напряженности намагничивающего поля и частоты.

Установка УИММ-2 предназначена, в первую очередь, для метрологических целей как аппаратура для аттестации нормальных образцов.

Кроме того, установка может быть использована как научно-исследовательскими институтами, так и лабораториями промышленных предприятий, разрабатывающих или применяющих высокочастотные ферромагнитные материалы и изделия с сердечниками из них.

Установка УКИП-1

Для измерения суммарных потерь в образцах ферромагнитных материалов при намагничивании их переменным током повышенной частоты в качестве контрольного метода был выбран калориметрический метод.

* Все элементы установки, за исключением термоамперметров Т-13, гетеродинного волномера ВГ-528 и симметрирующего трансформатора СЭТ-12, выпускаются заводом «Эталон».

Принцип калориметрического метода заключается в том, что энергия, выделяемая в ферромагнитном материале, переходя в тепловую форму, вызывает нагрев жидкости, находящейся в особом сосуде. По изменению температуры жидкости судят о количестве выделившегося тепла.

Основной частью калориметрической установки типа УКИП-1 (рис. 5) является сосуд Дьюара, наполненный трансформаторным маслом, в который помещается укрепленный на особом держателе образец в форме тора.

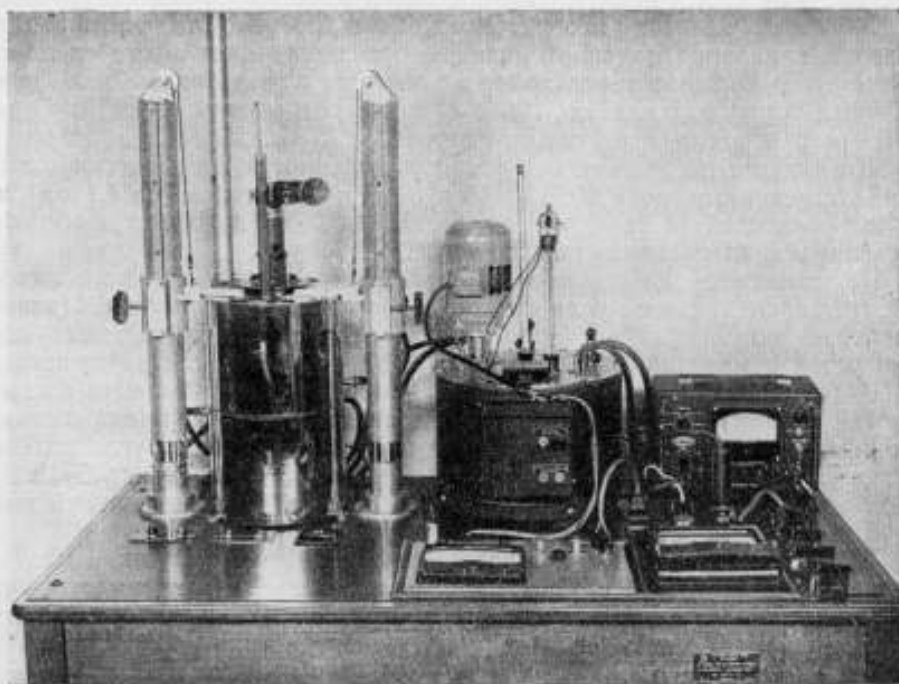


Рис. 5. Общий вид калориметрической установки УКИП-1.

Для перемешивания масла в сосуде имеются мешалки. Изменение температуры масла измеряется термометром на пределы измерения $18-22^{\circ}\text{C}$ с ценой деления $0,01^{\circ}\text{C}$.

Сосуд Дьюара помещен в футляр из гетинакса, а между ними проложен слой теплоизолирующего материала. Футляр вставлен в алюминиевый сосуд, который сам находится в разъемной оболочке, состоящей из верхнего и нижнего кожухов. Оболочка заполнена водой, температура которой поддерживается на заданном уровне за счет подогретой воды, прогоняемой от термостата по змеевикам, расположенным между стенками оболочки. Поддержание определенной температуры воды в термостате осуществляется с помощью электрических нагревателей и холодильника. Регулирование температуры с точностью $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ производится контактным термометром с магнитным шунтом.

Установка дает возможность определять суммарные потери в образце (в пределах от 1,5 до 100 *вт*) при намагничивании переменным полем звуковых частот в зависимости от максимальной магнитной индукции в испытуемом образце. Последняя определяется по среднему значению вторичной э. д. с., измеренному вольтметром средних значений.

Полные потери вычисляются по формуле

$$P = \frac{K\Delta\theta}{T} - I^2r,$$

где $\Delta\theta$ — подъем температуры за счет тепла, выделенного образцом, град;

T — время пропускания намагничивающего тока, сек;

K — тепловое значение калориметрической системы, дж/град;

I^2r — мощность, выделенная намагничивающей обмоткой образца при пропускании переменного тока, вт.

Тепловое значение калориметрической системы определяется количеством тепла, выделенным известной мощностью постоянного тока.

Погрешность измерения полных потерь калориметрическим методом не превышает 1,5%.

Примечание. Покупными приборами, входящими в комплект установки, являются термостат типа ТС-15, равноделенные термометры с ценой деления 0,01° С, амперметр типа М104/1. Эти приборы являются стандартными и выпускаются промышленностью. Остальные элементы установки изготавливаются заводом «Эталон».

Установка УКИП-2

Для измерения потерь в образцах высокочастотных материалов (ферриты, магнитодиэлектрики и т. п.), обладающих значительно меньшими потерями, чем листовые магнитномягкие материалы, создана другая разновидность калориметрической установки типа УКИП-2. Ее основным элементом является дифференциальный калориметр, обеспечивающий измерение суммарных потерь в образцах в пределах от $1 \cdot 10^{-2}$ до единиц ватт при частотах до 1 Мгц. Принципиальная схема установки изображена на рис. 6.

Калориметрические сосуды представляют собой металлические стаканчики, наполненные трансформаторным маслом, в один из которых помещен испытуемый образец ферромагнитного материала (с намагничивающей и измерительной обмотками), а во второй — заменитель образца (из полистирола) с обмоткой для пропускания по ней постоянного тока.

Индикатором равенства скорости изменения температуры масла в обоих сосудах является отсутствие отклонения указателя гальванометра, присоединенного к дифференциальной батарее термопар.

В качестве гальванометра в установке использован гальванометр с фотоэлектрическим усилителем.

При отсутствии показаний гальванометра суммарные потери в испытуемом образце равны мощности компенсирующего их постоянного тока

$$P = I^2r,$$

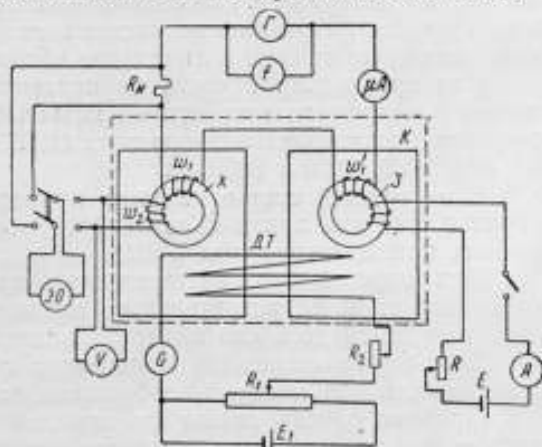


Рис. 6. Принципиальная схема дифференциального калориметра УКИП-2.

где I — сила постоянного тока, а;

r — сопротивление обмотки, навитой на полистироловый образец, *ом*.

Погрешность измерения потерь (в указанных выше пределах) не превышает $\pm 3\%$.

Максимальная магнитная индукция в образце, соответствующая измеренным потерям, определяется по величине вторичной э. д. с., измеренной с помощью вольтметра электронной системы.

Обе установки для измерения потерь калориметрическим методом предназначены главным образом для метрологического обслуживания путем аттестации на них нормальных образцов ферромагнитных материалов, по которым производится поверка другой менее точной аппаратуры для измерения потерь. Однако в отдельных случаях установки могут быть использованы различными научно-исследовательскими организациями (при повышенных требованиях к точности измерений, для сравнительных испытаний при импульсном и другом сложном намагничивании и т. п.).

Выше были перечислены образцовые установки, имеющиеся во ВНИИМ и доведенные до разряда поверочных установок. Кроме этого, магнитной лабораторией за последние три года был решен ряд методических вопросов, в ходе разработки которых созданы макеты и опытные образцы специальных приборов.

К таким вопросам относится методика испытания образцов ферромагнитных материалов при одновременном намагничивании двумя переменными полями различных частот и методика определения гистерезисных кривых по точкам в диапазоне частот от 50 *гц* до 5 *кгц*.

Для проведения первого из перечисленных исследований лабораторией электрических измерений ВНИИМ был создан компенсатор переменного тока координатного типа (КПТ-1) на фиксированные частоты 50, 400, 1000, 2400 и 8000 *гц*.

В настоящей статье на этом приборе останавливаться нецелесообразно, так как завод «Точэлектроприбор» уже начал выпуск аналогичного компенсатора типа У5015.

Для определения гистерезисных кривых по точкам был создан вольтметр с фазочувствительным выпрямителем, который в диапазоне частот от 50 *гц* до 5 *кгц* имеет приведенную погрешность не более 2%.

Блок-схема испытания кольцевого образца при помощи фазочувствительного вольтметра* изображена на рис. 7.

Принцип работы схемы при определении гистерезисного цикла аналогичен феррометру, выпускаемому фирмой Сименс Гальске.

Для получения гистерезисной петли фаза управляющего напряжения прямоугольной формы изменяется в пределах 360° дискретно и при каждом ее значении изменяются средние значения э. д. с. в измерительной обмотке на образце и во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности M .

Мгновенные значения напряженности магнитного поля и индукции, соответствующие моменту времени t_1 , вычисляются по формулам

$$B_{t_1} = \frac{|E_{\text{ср}}|_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}}}{4fS\omega_2};$$
$$H_{t_1} = \frac{\omega_1 |E_{M\text{ср}}|_{t_1}^{t_1 + \frac{T}{2}}}{4fMI_{\text{ср}}}.$$

* Собственно вольтметр обведен на схеме пунктиром.

Таблица 1

Максимальное значение магнитной индукции, $вб/м^2$	Потери в образце, измеренные		Расхождение результатов, %	Примечание
	калориметрическим методом (УКИП-1), $вт$	ваттметровым методом (с ваттметром термоэлектрической системы) (УМИПТ-1), $вт$		
0,65	3,46	3,48	0,6	Образец листовой электротехнической стали марки Э41 Частота намагничивающего тока 400 гц
0,70	3,92	3,96	1,0	
0,75	4,42	4,49	1,5	
0,80	4,97	5,05	1,6	
0,85	5,55	5,67	2,1	
0,90	6,17	6,27	1,6	
0,95	6,84	6,88	0,6	
1,00	7,54	7,56	0,2	

Таблица 2

Максимальное значение магнитной индукции, $вб/м^2$	Потери в образце, измеренные		Расхождение результатов измерения, %	Примечание
	калориметрическим методом (УКИП-2), $вт$	мостовым методом (УИММ-2), $вт$		
0,0115	0,544	0,536	1,5	Образец листовой холоднокатаной электротехнической стали марки Э330 Частота намагничивающего тока 300 кгц
0,0170	1,08	1,12	3,6	
0,0200	1,50	1,47	0,7	
0,0090	0,130	0,123	5,5	Образец феррита марки М-2000 Частота намагничивающего тока 1 Мгц
0,0140	0,281	0,267	5,0	
0,0210	0,690	0,663	4,0	

Таблица 3

Коэффициент формы кривой напряжения	Напряжение, измеренное			Расхождение к данному показанию, %
	двоным вольтметром, v	вольтметром с фазочувствительным выпрямителем, v	вольтметром с механическим выпрямителем, v	
1,13	1,06	1,10	—	3,8
1,18	2,25	2,29	—	1,8
1,24	2,87	2,89	—	0,7
1,5	2,95	3,05	—	3,4
1,7	1,20	1,24	—	3,3
1,15	1,00	—	1,00	0,0
2,00	2,00	—	2,04	2,0
2,15	3,00	—	3,04	1,3
2,00	7,00	—	6,96	0,6
2,12	9,00	—	8,96	0,4
1,6	14,00	—	13,98	0,1

При этом определение потерь и основных кривых намагничивания в динамическом режиме при частотах от 50 гц до 10 кгц производится в широком диапазоне индукций (от нескольких сотых теслы до 90—95 % от насыщения).

Для определения проницаемости и потерь в начальной области кривой намагничивания используется в указанном диапазоне частот мост фирмы Сулливан.

В области частот от 20 кгц до 1 Мгц основная кривая намагничивания и сопротивление потерь определяются мостовым методом, причем измерения производятся в начальной области кривой намагничивания.

Потери в том же диапазоне частот могут определяться в широком диапазоне индукций.

В настоящее время ВНИИМ ведет работы, посвященные методике аттестации нормальных образцов с известным значением гистерезисных кривых для ферромагнитных материалов при частотах от 50 гц до 5 кгц.

В ближайшие годы необходимо решить следующие методические вопросы, до сего времени еще не получившие метрологического развития:

1. Разработка методики и аппаратуры для поверки нормальных образцов магнитных материалов в области частот от 20 кгц до 1 Мгц при повышенных индукциях.

2. Разработка методики и аппаратуры для поверки нормальных образцов магнитодиэлектриков в широком диапазоне частот.

3. Выбор характеристик ферромагнитных материалов при различных режимах импульсного намагничивания и разработка методики их определения.

4. Разработка методики поверки по нормальным образцам устройства, определяющих гистерезисные кривые ферромагнитных материалов в широком диапазоне частот.

5. Выбор характеристик и разработка методов их определений для образцов ферритов малых размеров и для ферромагнитных пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Егоров Г. Е. и Чернышев Е. Т., Коэффициент формы кривой напряжения при измерении потерь на гистерезис и токи Фуко, Труды ВИМС, вып. 7(23), 1935.

2. Чернышева Н. Г. и Чечурина Е. Н., Установка для испытания образцов ферромагнитных материалов на переменном токе частотой до 10 кгц и при одновременном намагничивании в постоянном и переменном полях, Труды ВНИИМ, вып. 43(103), 1960.

Е. А. БУДНИЦКАЯ, С. М. НИЖНИЙ

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЧАСТОТАХ ДО 10 кгц

Статья посвящена описанию разработанной заводом «Точэлектроприбор» для серийного выпуска мостовой установки для определения характеристик магнитномягких материалов в диапазоне частот от 400 до 10 000 гц. В установке предусмотрена также возможность определения магнитных характеристик материалов в режиме подмагничивания постоянным током.

Первым промышленным образцом установки для испытания магнитномягких материалов на повышенных частотах явилась установка типа У520, выпускаемая заводом «Точэлектроприбор» с 1954 г.

Выпуск этой установки дал возможность на ряде промышленных предприятий осуществить правильный выбор и контроль толщины пластин применяемых магнитномягких материалов, определить качество изоляции между пластинами в сердечнике, а также судить об изменении характеристик магнитномягких материалов с ростом частоты.

В основу измерительной схемы установки типа У520 были положены две мостовые схемы, обеспечивающие простой и удобный, не зависящий от частоты, отсчет на регулируемых элементах моста при определении индуктивности и эквивалентного сопротивления потерь испытываемого образца.

В связи со спецификой работы мостовых схем определялись зависимости по первым гармоникам при синусоидальной индукции или напряженности поля.

При разработке установки были выбраны частоты 500, 1000, 2400 и 4800 гц против первоначально намеченной частоты 1000 гц. Предел измерения индуктивности установки лежит в пределах от 1 мгн до 1 гн при тангенсе угла потерь $0,04 \div 0,6$. Средняя погрешность определения индуктивности порядка 1—2%, а эквивалентного сопротивления потерь — порядка 5%. Предел измерений по напряженности поля — от сотых до единиц эрстед, по индукции — до 80% от индукции насыщения, в зависимости от свойств испытываемого материала.

В настоящее время в связи с возросшими требованиями промышленности на заводе начаты работы по усовершенствованию установки типа У520, которая получит заводское обозначение У5017. При разработке этой установки будут максимально учтены все пожелания потребителей, чьи отзывы, устные и письменные, об эксплуатационных качествах установки заводом уже частично собраны.

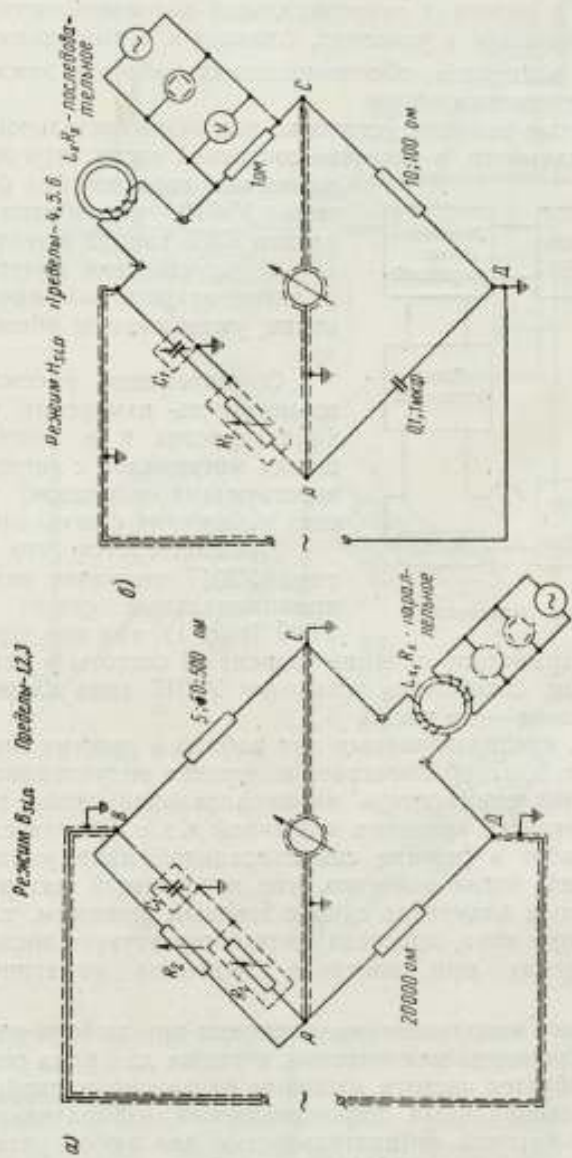


Рис. 1. Принципиальная схема установки У520: а — схема для работы в режиме синусоидальной индукции; б — схема для работы в режиме синусоидальной напряженности поля.

Усовершенствованная установка У5017 будет отличаться от установки У520:

1) расширенным частотным диапазоном; возможностью производить измерения при любой рабочей частоте в диапазоне от 400 до 10 000 гц;

2) усовершенствованной методикой измерений с применением упрощенных графиков, обеспечивающих максимальное использование установки при работе в режимах синусоидальной напряженности поля или синусоидальной индукции в условиях, близких к насыщениям;

3) введением элементов, обеспечивающих работу в режиме с намагничиванием постоянным током;

4) возможностью выпуска установки как самостоятельной единицы, и, в случае необходимости, в качестве составной части (при измерениях по первым гармоникам) феррометра типа У5010, разработка которого

начата СКБ завода в текущем году;

5) улучшением конструктивных и эксплуатационных качеств установки, уменьшением общих габаритов.

Одновременно рассматривается возможность измерения магнитных характеристик и в режимах насыщения материалов с введением соответствующих поправок, учитывающих искажения формы кривой.

Предполагается, что установка типа У5017 сохранит неизменными принципиальные схемы установки У520 (рис. 1), так как они при



Рис. 2. Блок-схема установки.

правильном выборе параметров плеч не зависят от частоты в рабочем диапазоне до 10 000 гц. Блок-схема установки У5017 дана на рис. 2, а ее принципиальная схема — на рис. 3.

Одна из схем, предназначенных для работы в режиме синусоидальной индукции (рис. 1, а), обеспечивает измерение индуктивности и эквивалентного сопротивления потерь по параллельной схеме замещения, при этом контролируется величина вторичной э. д. с. Вторая схема предназначена для работ в режиме синусоидальной напряженности поля (рис. 1, б — случай, когда известно, что проверяемый материал будет использован только в элементах схем с токовым режимом, т. е. в качестве трансформатора тока, дросселя), что соответствует последовательной схеме замещения при контроле величины намагничивающего тока.

Для наилучшего использования установки при выборе оптимальной толщины материала ленты или пластин, а также для ряда специальных случаев, когда требуется частота, отличная от фиксированной, на заводе был разработан специальный широкополосный избирательный усилитель типа Ф510 с высокой избирательностью для любой установленной частоты в диапазоне частот 400—10 000 гц. Чувствительность усилителя такова, что при подведении к его входу напряжения в 5 мкв отклонение электронного луча на выходе электронно-лучевой трубки составит 3—10 мм. Вход усилителя трансформаторный с малым значением емкости обмоток относительно земли, благодаря чему не возникает дополнительной частотной погрешности при подключении указателя равновесия в схему. Избирательность по второй гармонике 54—60 дб, а по третьей 60—70 дб, что обеспечивает нормальную работу установки.

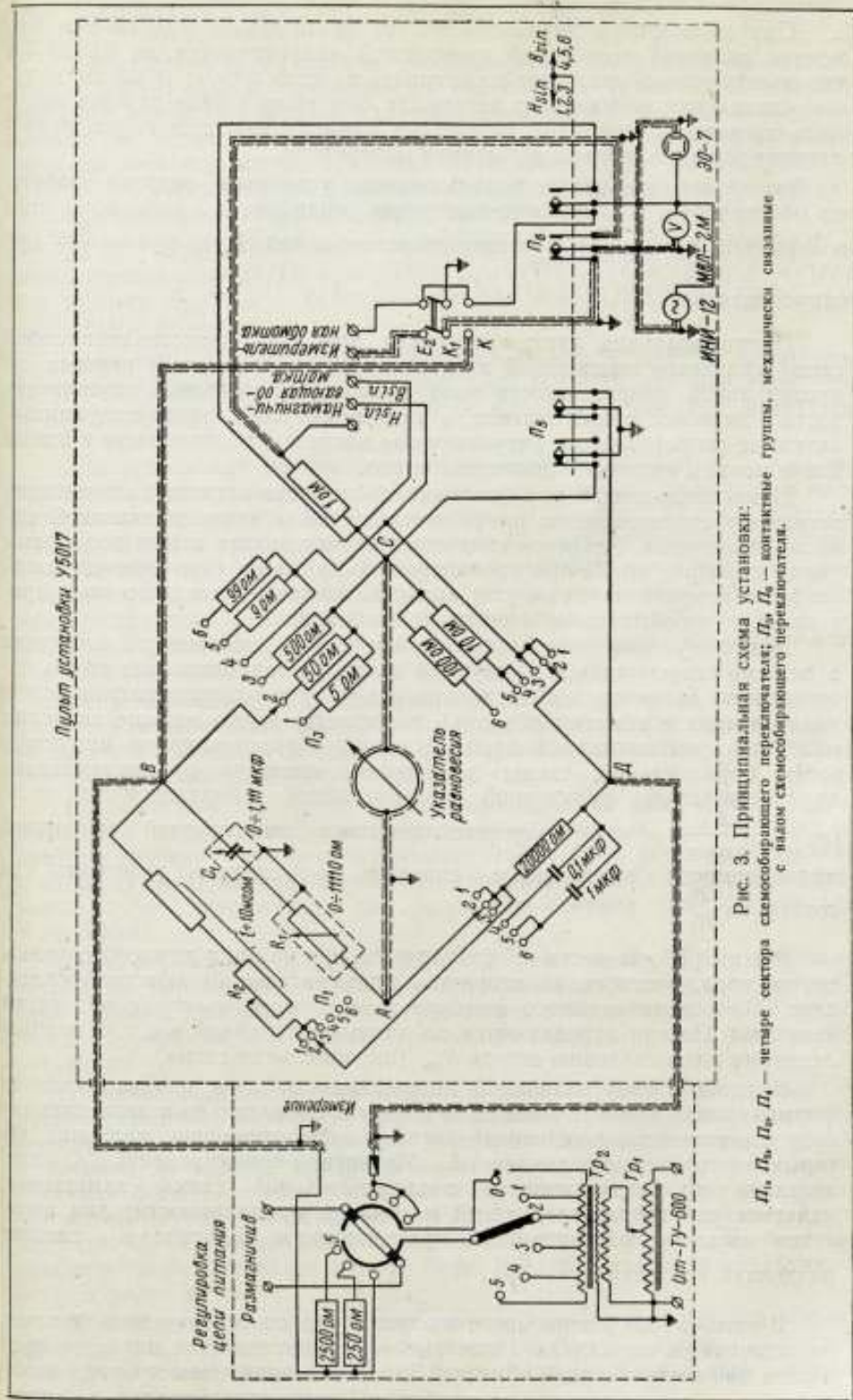


Рис. 3. Принципиальная схема установки.
 П₁, П₂, П₃, П₄ — четыре сектора коммутатора; К₁, К₂, К₃, К₄ — контактные группы, механически связанные с вращением коммутатора.

При расширении диапазона частот до 10 000 гц естественно снижается величина возможной измеряемой индуктивности до 0,0001 гн, что одновременно позволяет наматывать на испытуемые образцы меньшее число намагничивающих витков. За счет этого в ряде случаев могут быть введены специальные разъемные намагничивающие витки, позволяющие ускорить процесс испытания материалов.

Для более широкого использования установки ведутся работы по обеспечению возможности измерения сердечников с тангенсом угла потерь $0,02 \div 2$ ($\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega L}{R_{\text{пр}}}$ при синусоидальной B , и $\operatorname{tg} \delta = \frac{R_{\text{ис}}}{\omega L}$ при синусоидальной H).

Принципиальная схема установки (рис. 3) представляет собой схему сравнения неизвестной индуктивности с емкостью. В режиме синусоидальной напряженности поля плечами соотношения служат емкость и активное сопротивление, а в схеме синусоидальной индукции — активные сопротивления. Регулируемые элементы расположены в одном плече моста и включены последовательно.

Намагничивающий ток проходит по последовательно включенному активному сопротивлению плеча соотношений и намагничивающей обмотке сердечника. Значения сопротивления элементов схемы подобраны таким образом, чтобы при уравнивании схемы (при помощи магазинов сопротивления и емкости) величина намагничивающего тока, протекающего по обмотке сердечника, не изменялась.

Для получения максимального значения неискаженной индукции в режиме синусоидальной индукции активное сопротивление плеча соотношения, включенное последовательно (а также сопротивление источника питания и обмотки образца), выбирается много меньше значения ωL . При этом магнитная проницаемость, определенная по индуктивности параллельной схемы замещения, является проницаемостью, характеризующей реактивной составляющей напряженности поля ($\mu_L = \frac{B}{H_1 \text{ реакт}}$); для получения значения амплитудной магнитной проницаемости вычисленное значение μ_L следует умножить на $\cos \delta$ ($\mu_a = \frac{B}{H_1}$).

Режим работы моста контролируется при помощи лампового вольтметра, подключенного ко вторичной (измерительной) обмотке сердечника. По показанию этого прибора вычисляются значения магнитной индукции. Потери определяются по данным вторичной э.д.с. и эквивалентному сопротивлению потерь $R_{\text{пр}}$ (параллельная схема).

В режиме синусоидальной напряженности поля для исправления формы кривой намагничивающего тока последовательно в цепь питания будут подключены переменные активные сопротивления, величина которых много больше величины ωL_x . Магнитная проницаемость μ_L , определенная по индуктивности последовательной схемы замещения, является упругой составляющей магнитной проницаемости; для получения амплитудной магнитной проницаемости значение μ_L следует разделить на $\cos \delta$ ($\mu_a = \frac{B_1}{H}$).

В этом случае режим моста контролируется ламповым вольтметром, подключенным параллельно одноомному сопротивлению, находящемуся в цепи намагничивающей обмотки. Значения напряженности поля вычисляются по показаниям этого прибора. Потери определяются по значе-

нию намагничивающего тока и эквивалентному сопротивлению потерь $R_{\text{пс}}$ (последовательная схема).

В настоящее время начаты экспериментальные работы по определению максимальной разрешающей способности установки в области наиболее широких пределов напряженности поля и индукции. Ведутся работы по расширению предела измеряемых величин напряженности поля до десятков эрстед для ряда материалов. При частотах 5000—10 000 гц увеличивается возможность работы при малых напряженностях поля порядка тысячных долей эрстеда.

На установке обеспечивается снятие зависимостей: в режиме H_{sin} определяются $\mu_L = f(H)$; $\mu_a = f(H)$; $B_1 = f(H)$; $\text{tg } \delta = f(H)$; $P = f(H)$ и в режиме B_{sin} — $\mu_L = f(B)$; $\mu_a = f(B)$; $B = f(H_1)$; $B = f(H_{\text{реакт}})$; $\text{tg } \delta = f(B)$; $P = f(B)$.

Нелинейные искажения могут контролироваться в установке измерителем нелинейных искажений типа ИНИ²12 для введения поправок в данные характеристики при наличии искажений в кривых B и H .

Для устранения реактивных добавочных сопротивлений в элементах схемы моста вводятся специальные компенсации постоянных времени активных сопротивлений до значений 10^{-8} сек при помощи емкости и индуктивности (мощность, выделяемая на сопротивлениях, до 8 вт). Ведутся работы по выбору оптимальных условий заземления в схеме и правильного подсоединения экранов регулируемых плеч, чтобы влияние действующих емкостей было минимальным, а также по правильному расположению и выбору конструкции подводящих проводников от указателя равновесия и источника питания.

Первоначальные экспериментальные работы показали возможность расширения диапазона рабочих частот до 10 000 гц без практического увеличения погрешности схемы в расширенном диапазоне измеряемых тангенса угла потерь и индуктивности.

Рассматриваются вопросы о целесообразности включения в измерительную схему трех типов вольтметров: пиковых, действующих и средних значений для снятия кривых $B = f(H)$ в режимах, близких к насыщению. Последнее весьма целесообразно для случая, когда установка будет выпускаться как основная единица без феррометра типа У5010.

При совместном комплектовании с установкой У5010 питающее устройство переменного тока, регулирующие элементы и контролируемые приборы для установки и феррометра, а также внешнее оформление будут общими, что и будет учтено при конструктивном выполнении установки.

Наличие указателя равновесия с высокой избирательностью по второй гармонике позволило уже в настоящее время начать испытания магнитномягких материалов при подмагничивании постоянным током величиной до единиц ампер. В качестве регулирующего устройства, дросселя фильтра и контролирующего прибора будут применены такие же элементы, как и в феррометре У5010. Цепь подмагничивания будет подводиться к специальной намагничивающей обмотке. В качестве фильтра последовательно в цепь будет включен дроссель индуктивностью порядка 80 гм.

Для облегчения подсчета измеряемых величин и ускорения выбора оптимальных параметров (геометрические размеры, числа намагничивающих и измерительных витков) были созданы специальные графики.

В настоящее время они перерабатываются на расширенную область частот и упрощаются; при этом в графиках будут охвачены сердечники, имеющие диаметры $1-20$ см и сечения $0,05-2$ см².

Параметры установки будут также улучшены без увеличения размеров измерительного пульта, что будет осуществлено в основном путем

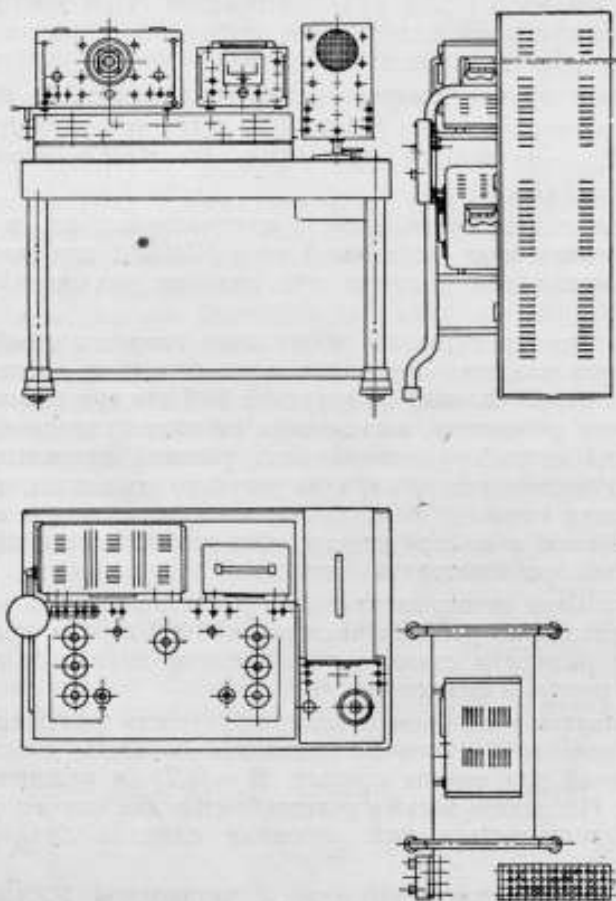


Рис. 4. Внешний вид установки V5017.

рационального размещения монтажа. Чертеж общего вида установки приведен на рис. 4.

Ведутся работы по уменьшению шумов и помех в усилителе мощности за счет некоторого изменения его параметров и создания специальных компенсирующих схем на входе усилителя. Размеры вспомогательного устройства, служащего для регулирования намагничивающего тока, могут быть значительно уменьшены.

Одновременно следует отметить, что до настоящего времени не имеется отечественного усилителя мощности, обладающего качествами, необходимыми для работ в измерительных схемах: возможностью глубокого регулирования напряжения от сотых долей вольта до сотен вольт без соответствующего увеличения фона; в усилителе мощностью типа ТУ 600 имеется большое количество ненужных, усложняющих

эксплуатацию регулирований, большая несогласованность выхода при реактивной нагрузке.

Целесообразна разработка и выпуск на одном из специализированных предприятий усилителя мощности переменного тока, предназначенного для питания измерительных схем.

Габариты установки У5017 не будут превышать габаритов установки типа У520 в случае отдельной поставки установки с питающими блоками без феррометра.

Разработка установки типа У5017 будет окончена в 1961 г., а серийный выпуск должен быть начат в 1962 г.

К ВОПРОСУ О МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАТЕРИАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАМАГНИЧИВАНИЯ

В статье рассматривается вопрос о выборе характеристик ферромагнитного материала, работающего в условиях сложного намагничивания. Проводится мысль о том, что основная кривая намагничивания в переменных магнитных полях не является универсальной характеристикой ферромагнитного материала в различных условиях его работы.

При расчетах различных электромагнитных систем с ферромагнитными сердечниками, а также в технике магнитных измерений в качестве основной характеристики материала сердечника широкое распространение получила основная кривая намагничивания. Однако часто забывают, что эта кривая не только не отражает реальных процессов пере-

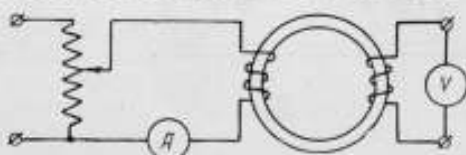


Рис. 1. Принципиальная схема для определения основной кривой намагничивания.

но служит для определения основной кривой намагничивания (рис. 1).

Приборы в схеме условно обозначают, что в любом случае каким-либо методом измеряются ток в намагничивающей обмотке образца, по которому рассчитывается напряженность намагничивающего поля, и напряжение на той же или другой обмотке для определения индукции в образце. В результате получается какая-то расчетная (средняя) индукция, не совпадающая с реальной индукцией в каждом объеме образца, и какая-то расчетная напряженность поля, вовсе не совпадающая с истинной напряженностью поля в образце.

Как известно, индукция и напряженность магнитного поля изменяются в каждом микроскопическом объеме образца по петлям гистерезиса. В результате же расчета мы получаем максимальное (действующее или максимальное для эквивалентной синусоиды) значение напряженности поля на поверхности образца и максимальное (или макси-

мальное для эквивалентной синусоиды) значение средней индукции по сечению образца [или то же самое для первых гармоник $H(t)$ и $B(t)$].

Таким образом, основная кривая намагничивания — это не что иное, как зависимость напряжения от тока. И только для того, чтобы отвлечься от чисел витков и сечения образца, нам необходимы вспомогательные характеристики (индукция и напряженность поля). Заметим, что наиболее хорошо совпадает расчет с экспериментом, если в результате расчета в устройстве с ферромагнитным сердечником также необходимо получить ток или напряжение.

Ясно, что в этих случаях вполне оправдана такая характеристика, как основная кривая намагничивания.

В настоящее время все чаще встречаются случаи, когда ферромагнитные сердечники различных электромагнитных устройств работают в более сложных условиях одновременного действия нескольких магнитных полей, да еще иногда и не совпадающих по направлению.

Попытки использовать и в этом случае основную кривую намагничивания никак нельзя оправдать. Обычно для обоснования возможности использования этой кривой при расчетах рассуждают следующим образом.

Потери в магнитномягких материалах (особенно в пермаллоэ) относительно малы. Представим себе, что мы постепенно уменьшаем потери. Петля гистерезиса (или динамическая петля перемагничивания) при этом сужается, и в конце концов, если потери отсутствуют (а при таких расчетах ими часто пренебрегают), то сужающаяся петля перейдет в основную кривую намагничивания. Дальше можно накладывать на материал различные магнитные поля — постоянные и переменные; все они будут изменять его магнитное состояние по основной кривой намагничивания.

В этом обосновании заложена ошибка, которую часто не замечают. Совершенно неверно предположение, что если в материале уменьшаются потери, а следовательно, сужается петля, то основная кривая намагничивания остается неизменной. Основная кривая намагничивания — это только геометрическое место вершин симметричных динамических петель, т. е. это кривая, каждая точка которой совпадает с истинным магнитным состоянием материала только мгновение за цикл (если вообще можно в какой-то степени говорить об истинном состоянии при измерениях в переменных магнитных полях).

Возьмем для примера четыре марки листовой электротехнической стали: Э11, Э31, Э41 и Э330 (это марки стали, у которых потери последовательно уменьшаются) и рассмотрим, как же изменяется положение точек основной кривой намагничивания с уменьшением потерь (положение вершин соответствующих гистерезисных циклов).

Индукции в 5000 гс соответствуют величины напряженности поля, указанные ниже:

Марки стали	Э11	Э31	Э41	Э330
$H, \text{ а/см}$	1,1	0,85	0,65	0,20

Если взять материалы с еще меньшими потерями (например, пермаллоэ), то увидим, что напряженность поля, соответствующая этой индукции, уменьшается еще сильнее.

Если почему-либо у данной марки стали из-за невыполнения, например, технологических требований, возросли потери, то основная кривая намагничивания всегда отклоняется вправо в координатной плоскости BH .

Таким образом, если говорят, что потери у стали уменьшаются, то это всегда соответствует не только сужению гистерезисной петли, но и

уменьшению ее наклона к оси индукции, а основная кривая намагничивания *a* перемещается в направлении, показанном стрелкой на рис. 2. В пределе получим безгистерезисную кривую намагничивания *b*, идущую по оси ординат. Проницаемость на этой кривой равна бесконечности, а следовательно, и индуктивность катушки с сердечником равна бесконечности, что значительно осложняет рассмотрение вопросов перемагничивания в переменных магнитных полях.

Другого пути изменения хода основной кривой намагничивания не может быть, любой другой путь противоречит физическим представлениям о процессах, происходящих в ферромагнитных материалах при их перемагничивании.

Все это длинное рассуждение приведено для обоснования следующей мысли. Пора отказаться от основной кривой намагничивания в переменных магнитных полях, как от основной базовой характеристики поведения ферромагнитных материалов во всех условиях перемагничивания.

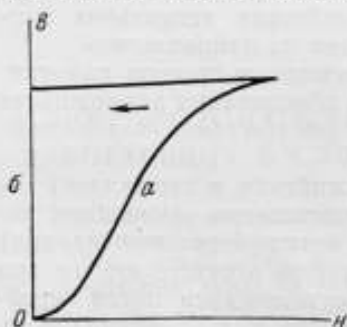


Рис. 2. Основная кривая намагничивания.

Поскольку в настоящее время нельзя проводить расчеты с использованием динамических петель (и особенно частных петель), необходимо каждое условие перемагничивания описывать своими параметрами, которые совершенно равноправны с основной кривой намагничивания. Такие характеристики уже вводятся, например, для расчета магнитных усилителей применяется характеристика, представляющая собой серию кривых зависи-

мости переменной составляющей индукции от переменной составляющей напряженности магнитного поля для ряда значений постоянного магнитного поля и т. п. Но эти и другие подобные характеристики вводятся очень робко, как вспомогательные.

Нам кажется, что необходимо четко заявить, что основная кривая намагничивания может применяться только для расчета механизмов, работающих в условиях циклического перемагничивания. Для расчета же устройств, работающих в иных условиях, необходимы другие характеристики.

В частности, была исследована работа ферромагнитных материалов в качестве сердечников феррозондов, т. е. устройств, применяемых для обнаружения и измерения напряженности магнитных полей, работающих по принципу удвоения частоты. Было установлено, что основной характеристикой материалов и сердечников из них является зависимость индукции второй гармоники от напряженности постоянного (или переменного) измеряемого поля для ряда значений переменного поля возбуждения.

Под амплитудой индукции второй гармоники B_{2m} понимается индукция, рассчитанная по формуле

$$B_{2m} = \frac{E_2 10^8}{4,44 f_2 w S},$$

где E_2 — величина второй гармоники э. д. с., измеренная на выходе соответствующей обмотки образца. Имеется в виду, что на выходе этой обмотки стоит резонансный вольтметр, настроенный на частоту второй гармоники или резонансный усилитель с электронным вольтметром на

выходе (И. И. Кифер, М. С. Цепляева, «Заводская лаборатория», № 11, 1960).

Точно также необходимы специальные характеристики для расчета устройств, работающих при наложении двух магнитных полей под прямым углом друг к другу, в импульсном режиме, при одновременном действии двух или более переменных магнитных полей при сверхвысоких частотах и т. п.

В заключение несколько слов о путях дальнейшего развития техники измерений в переменных магнитных полях.

Судя по докладам о новой аппаратуре для магнитных измерений, тенденция разработки и производства магнитоизмерительной аппаратуры направлена по пути создания сложных, громоздких и дорогих комплектных установок, в основном пригодных лишь для лабораторий, да еще с очень квалифицированным штатом. Авторам кажется, что это неправильная тенденция. В настоящее время нужны не сложные установки, вроде моста У520, феррометра У542, У55 и т. п., а отдельные блоки: резонансные усилители, электронные вольтметры средних и амплитудных значений (более высокого класса), высококачественные усилители мощности (усилитель ТУ600, которыми снабжены установки У520, сложен в обращении, капризен и искажает форму кривой подаваемого напряжения), измерительные сопротивления с малой постоянной времени, наборы катушек индуктивности, рассчитанные на широкий диапазон частот, магазины емкостей и т. п.

Из этих универсальных блоков можно собрать необходимые установки для измерения разнообразных характеристик, описывающих различные условия работы ферромагнитных материалов.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Описывается метод и установка для определения зависимости основных магнитных характеристик и температуры Кюри. Высокая чувствительность метода дает возможность производить измерения на образцах массой порядка 1 мг.

Рассматриваемый метод позволяет измерять температурные зависимости различных магнитных характеристик (кривые намагничивания вещества, кривые магнитной восприимчивости, проницаемости, кривые намагничивания в динамическом режиме) и температуру Кюри.

Чувствительность метода дает возможность проводить измерения на образцах магнитных веществ массой до 1 мг, а с применением специальных усилителей э. д. с. чувствительность еще может быть повышена. Это дает возможность работать (без манипулятора) с образцами, имеющими остаточную радиоактивность вне биологически опасной дозы излучения.

В методе используются дифференциальные катушки специальной конструкции, включенные встречно. Принципиально применение дифференциальных катушек в измерительной технике не ново. Однако для целей температурных измерений и только измерений температуры Кюри, дифференциальные катушки были применены впервые в АН УССР и в Институте физики АН Латвийской ССР, независимо друг от друга. Отличие последней конструкции заключается в том, что она имеет одну измерительную катушку, помещенную в нулевом поле, и самостоятельные нагреватели, удаленные от намагничивающих обмоток, что очень важно, если измерять не только температуру Кюри.

Дифференциальный метод отличается высокой чувствительностью измерения, простотой схемы и технологии работы. В этом случае создается возможность применять типовую аппаратуру и промышленный ток, использовать обычные электротехнические материалы, помещать внутри катушки вместо нагревателя дьюары с жидким газом и исследуемым образцом, а также использовать малые массы магнитного материала, что очень важно при работах, связанных с радиоактивностью. Ось дифференциальных катушек может быть расположена вертикально. Специальное охлаждение не является необходимостью.

На рис. 1 и 2 представлена конструкция прибора в лабораторном исполнении АН Латвийской ССР. На этих рисунках: НК — намагни-

чивающие катушки (два соленоида, магнитные потоки которых включены встречно), *НК* — измерительная катушка с 2÷4 тысячами витков провода марки ПЭЛ-0,1, помещенная в нулевом магнитном поле, *КК* — компенсационная катушка. Удлиненный соленоид имеет 600÷900 витков провода ПЭЛ-0,51÷0,33, вторая намагничивающая катушка *НК* вместе с компенсационной *КК* имеет на 100 витков больше. Каркас изготовлен из фарфора или глины с асбестовой теплоизоляцией. Компенсационная катушка включается последовательно с соседней намагничивающей катушкой. Конструкция, изображенная на рис. 1, применяется только для измерений температуры Кюри, а конструкция на рис. 2 — универсальна.

На оси намагничивающей катушки *НК* расположена сменная цилиндрическая фарфоровая печь мощностью 50—150 *вт*. Большая мощность нагревателей не целесообразна. При-

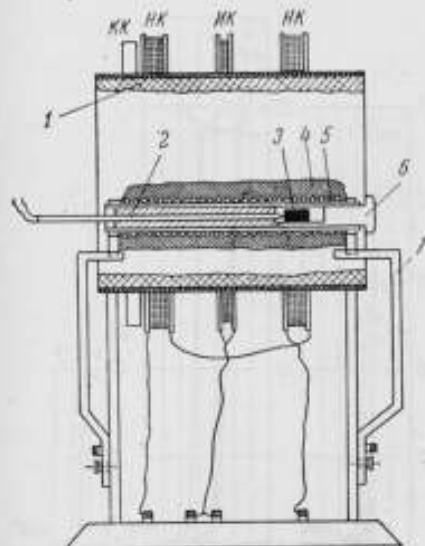


Рис. 1. Конструкция прибора для определения температуры Кюри.

1 — теплоизоляция; 2 — термопара; 3 — измеряемый образец; 4 — теплоизоляция; 5 — фарфоровый нагреватель; 6 — фарфоровая пробка — лоток; 7 — токопроводящие шины печи.

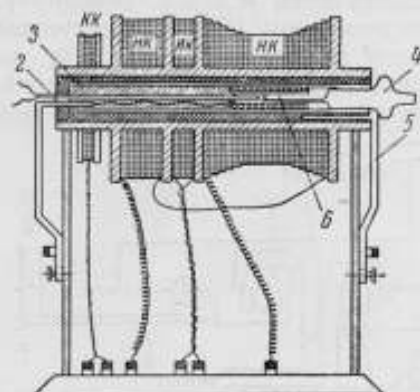


Рис. 2. Конструкция универсального прибора.

1 — подводка тока к нагревателю; 2 — термопара; 3 — теплоизоляция; 4 — фарфоровая пробка — лоток; 5 — токопроводящие шины печи; 6 — образец в нагревателе.

менением теплоизоляции снаружи спирали легко достигается внутри нагревателя температура 900—1000°С. С тыльной стороны печи вмонтирована термопара, а с лицевой — вкладывается исследуемый образец на фарфоровом совочке, оканчивающемся фарфоровой пробкой. Для измерения только температуры Кюри образцы могут иметь произвольную форму. Внутри печи образец соприкасается с термопарой. Если образец весьма мал, то он крепится на рабочем спае термопары. Самое выгодное местоположение образца — в центре *НК*. В большинстве случаев необходимо пользоваться немагнитными термопарами, так как магнитный материал термопары, например, хромель-алюмель (алюмель обладает магнитными свойствами), вызывает влияние, аналогичное влиянию измеряемого образца. Для точки Кюри выше 200°С этой термопарой можно пользоваться.

Сменные печи вставляются в разрез токопроводящих шин подобно плавкому предохранителю и имеют разные диаметры от 2 до 20 мм. Целесообразно иметь конструкцию дифференциальных катушек нескольких габаритов для очень малых и обычных масс образцов. При исследовании ферритов измеритель может иметь малые габариты. Изображенная на рис. 2 печь в действительности меньшего размера (около 3 мм).

Методика измерения температуры Кюри несколько отличается от методики измерения кривой намагничивания. Рассмотрим метод измерения только точки Кюри и затем метод измерения намагничивания.

При измерении температуры Кюри дифференциальные катушки включаются в схему, изображенную на рис. 3. Намагничивающие катушки питаются переменным током частоты 50 гц. Сила тока в них устанавливается в зависимости от требуемого расчетного магнитного поля.

Обычно использовались поля 5—15 э. В измерительной катушке перемещением компенсационной катушки устанавливается нулевая э. д. с. без измеряемого образца, что определяется по показанию подключенного к ней милливольтметра переменного тока (например, ЛВ-9 или ВГ). Термопара соединяется с измерителем т. э. д. с. (например, потенциометром ПП). Исследуемый образец вводится внутрь печи до соприкосновения с термопарой, а печь закрывается фарфоровой

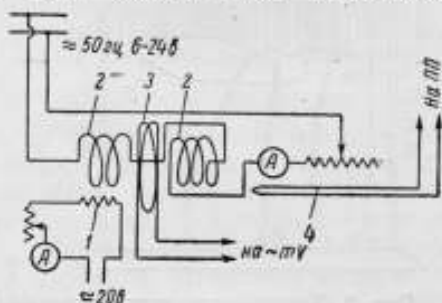


Рис. 3. Схема включения прибора.

1 — нагреватель; 2 — намагничивающие катушки; 3 — измерительная катушка; 4 — термопара. Компенсационная катушка (на схеме отсутствует) включается последовательно с намагничивающими.

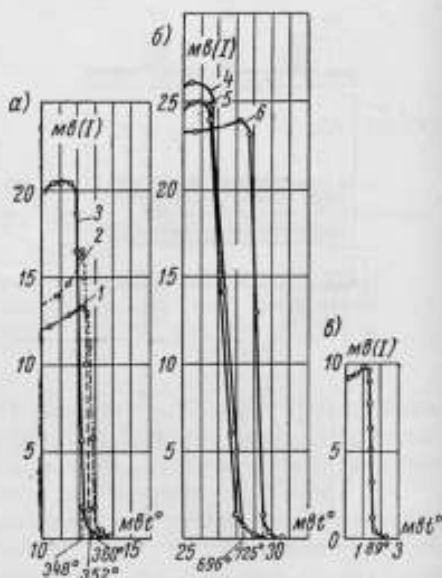


Рис. 4. Результаты измерения точки Кюри разных материалов.

а — никеля (1, 2, 3) с различными примесями; б — железной проволоки (4, 5), трансформаторного железа (6) с хромель-алюмелевой термопарой; а — феррит Ф-2000 с хромель-медной термопарой.

пробкой. При этом нарушается равновесие дифференциальной схемы и поскольку в одном из ее плеч (при одной НК) появился ферромагнитный образец, на милливольтметре будут показания, пропорциональные намагниченности помещенного образца. При нагреве выше точки Кюри э. д. с. небаланса исчезает.

При питании нагревателя печи переменным током появляется дополнительная э. д. с., прибавляющаяся к э. д. с., вызванной наличием образца. Это вынуждает в момент измерения выключать нагреватель печи или работать на охлаждении. Удобнее нагреватель делать с бифилярной обмоткой. Можно применять и однослойную катушку нагревателя, но питать его постоянным током, не дающим дополнительного небаланса. Наконец, можно работать только на охлаждении, применяя посторонний нагрев.

Работа с бифилярной обмоткой или на постоянном токе имеет преимущество, так как она дает возможность термоостативирования.

Если при этом одновременно измерять температуру и э. д. с. небаланса от образца, то получим систему точек, которая в координатах:

температура образца и э. д. с. небаланса образует график с крутым падением в точке Кюри (рис. 4).

Экстраполяция на ось температур крутого спада полученных графиков проводится, как обычно, по самому характерному участку.

На рис. 4 приведены графики для различных магнитных материалов, образцы которых были разной массы и формы.

Точность метода в основном определяется погрешностями измерения температуры.

УСТАНОВКА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье дано описание установки для определения зависимости магнитной проницаемости от температуры стержневых образцов ферритов. Установка снабжена устройством для записи этой зависимости одновременно для одиннадцати образцов.

Установка для определения зависимости магнитной проницаемости от температуры была изготовлена в макетном исполнении и предназначалась для определения точки Кюри у одиннадцати стержневых образцов ферритов с одновременной записью температуры во времени.

Установка состоит из стального термоблока, помещенного в печь 3, устройств 4, регулирующих нагрев термоблока, и самопишущего потенциометра 1 на двенадцать точек. На рис. 1 изображен макет этой установки.

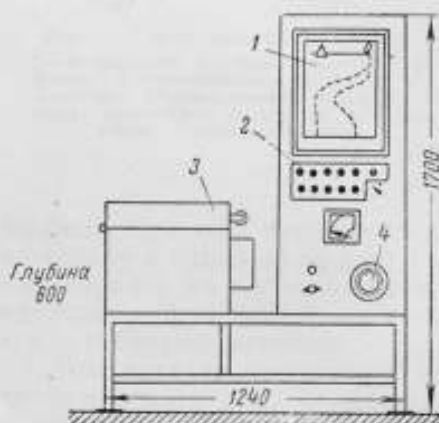


Рис. 1. Эскиз установки.

Испытуемые образцы ферритов помещаются в катушки термоблока печи. На передней панели имеются одиннадцать регуляторов входа 2, которые позволяют установить начальные положения записи перед нагревом образцов. Таким образом, установка не определяет величины магнитной проницаемости, а лишь производит запись изменения этой величины в зависимости от температуры. Если считать начальное положение каретки самопишущего потенциометра за положение, соответствующее 100% магнитной проницаемости, то все остальные положения покажут ее процентное изменение.

На рис. 2 изображена схема установки. В термоблоке 2 с нагревателем 3 подмагничивающие обмотки включены последовательно. Ток, прстекающий через эти обмотки, стабилизирован барреретом 1. Каждый испытуемый образец вставляется в две измерительные обмотки, которые включены встречно. Обмотка, нанесенная на фарфоровую трубку малого диаметра, вставлена в катушку большого диаметра. Числа вит-

ков подобраны так, что без образца феррита в катушке результирующее напряжение равно нулю. При введении феррита результирующее напряжение с измерительных катушек подается на регуляторы входа и через переключатель 7 самопишущего потенциометра 4 на вход усилителя-детектора 6. Выпрямленное напряжение поступает через второе контактное поле переключателя 5 на вход потенциометра.

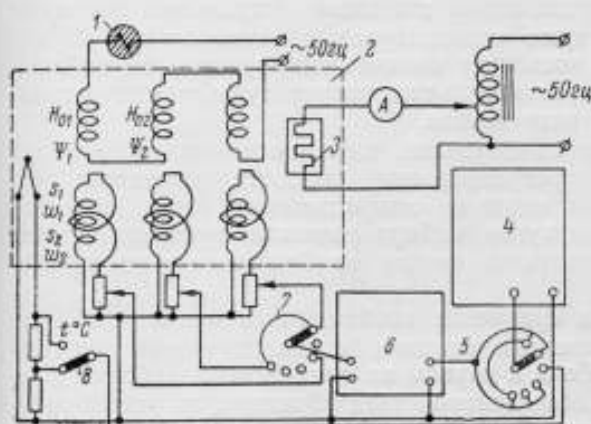


Рис. 2. Принципиальная схема установки.

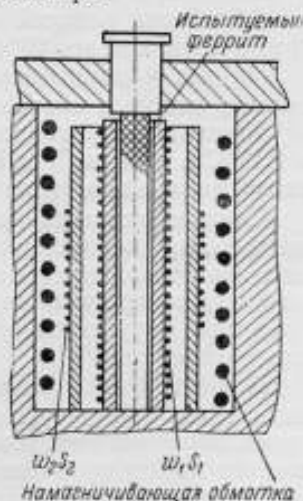


Рис. 3. Эскиз гнезда термоблока.

В одном из положений переключателя на вход потенциометра поступает напряжение с термопары 9. Для получения двух масштабов записи температуры имеется специальный переключатель 8.

На рис. 3 показано расположение намагничивающей и измерительных обмоток в гнезде термоблока. Испытуемый феррит помещается внутрь катушки и прижимается сверху стальной пробкой. Таким образом, в процессе нагрева зазоры между ферритом и термоблоком не изменяются.

Благодаря большой массе термоблока разница температур в различных его точках не превышает 1°C .

Кроме того, стальной термоблок обеспечивает надежную магнитную экранировку одной измерительной системы от другой, являясь в то же время магнитопроводом этих систем.

Нетрудно показать, что уравнение полного потокоцепления с измерительными обмотками будет иметь такой вид

$$\Psi = \frac{\mu_0 H_0 S_2 (w_1 - w_2) (1 - N) (\mu_2 - 1)}{1 + N (\mu_2 - 1)}$$

при достаточно малой величине коэффициента размагничивания N величина э. д. с. будет пропорциональна значению магнитной проницаемости минус единица. В процессе нагрева, когда магнитная проницае-

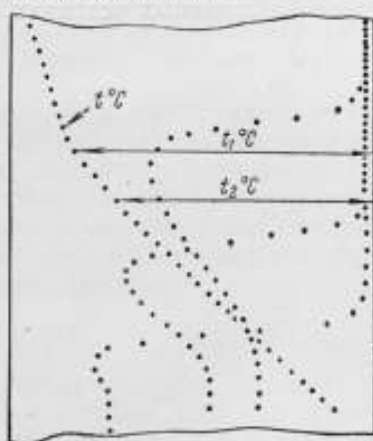


Рис. 4. Образец записи на ленте самопишущего прибора.

мость μ_2 будет равна единице, потокоцепление Ω будет равно нулю. В этом случае самопишущий потенциометр поставит каретку на нуль.

В целях получения записи изменения магнитной проницаемости от температуры в удобной координатной сетке, т. е. для получения графика, в котором температура растет слева направо, нуль самопишущего потенциометра помещен на шкале справа.

Обработка записей сводится лишь к нанесению линий в температурных точках через 20°C .

На рис. 4 изображен кусок ленты с записью (стрелками показаны отрезки, которые соответствуют температурам с интервалом в 20°C).

Мощность нагревателя позволяет поднять температуру термоблока до 560°C в течение 7 ч. Скорость подъема температуры можно регулировать изменением тока в нагревателе.

Следует отметить как положительное качество самопишущего потенциометра возможность регулирования скорости протяжки бумаги в широких пределах и периода отпечатывания точек. Это позволяет в конкретном случае путем выбора скорости протяжки бумаги и периода отпечатывания получить четкое изображение контролируемого параметра.

В заключение приведем сравнение необходимого времени определения точки Кюри существующим методом (с аналитическими весами) и предлагаемым методом. Если в первом за семичасовой рабочий день инженер может произвести исследование трех образцов, то рассмотренные установки могут позволить одному работнику сделать испытания тридцати трех образцов и более без особого напряжения.

Наличие записи температурной зависимости магнитной проницаемости феррита позволяет видеть влияние тех или иных компонентов на его магнитные свойства.

Простота обслуживания и большая производительность дают возможность рекомендовать подобные установки для контроля продукции в производственных условиях.

Л. В. МИТЕЛЬМАН

ДВУХКООРДИНАТНАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ УСТАНОВКА ТИПА ДСШУ-М ДЛЯ ЗАПИСИ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В статье описывается оригинальная установка, предназначенная для записи гистерезисных кривых ферромагнитных материалов в диапазоне частот от 50 гц до 20 кгц.

Несмотря на значительное развитие теории и техники магнитных измерений за последние десятилетия, зависимость $B=f(H)$, графически выражаемая в виде всем известных петель гистерезиса, была и остается одним из основных источников информации о свойствах ферромагнитного материала. Если материал работает в переменных полях, то указанная зависимость должна сниматься в динамическом режиме. Практически это сводится к нахождению функции $\int e_2(t) dt = f[i_1(t)]$, где $e_2(t)$ — напряжение на вторичной обмотке образца материала, а $i_1(t)$ — ток в его первичной обмотке.

Погрешность воспроизведения кривых $B=f(H)$ складывается, с одной стороны, из ошибок, допускаемых при расчетах напряженности поля внутри образца, его истинного сечения, отклонения формы образца от оптимальной и т. д., и, с другой, — ошибок, присущих выбранному методу измерений или прибору. Рассматриваемые ниже погрешности относятся только к методу измерений или прибору. Иными словами, имеются в виду погрешности воспроизведения кривых

$$\int e_2(t) dt = f[i_1(t)].$$

Обычно петли гистерезиса воспроизводятся путем одновременного отклонения каждым из функционально связанных сигналов электронного или светового луча осциллографа или пера самописца во взаимно-перпендикулярных направлениях. Отличия получаемого изображения от истинной зависимости определяются линейными и нелинейными искажениями, вносимыми в форму сигналов каналами прибора и индикатором. Линейные искажения определяются инерционностью (т. е. в основном полосой пропускаемых частот) и различием в фазочастотных характеристиках каналов и индикатора, а также погрешностями электрического интегрирования. Нелинейные искажения сводятся к амплитудным. Современные ферромагнитные материалы работают в широком диапазоне частот и обладают высокими скоростями перемагничи-

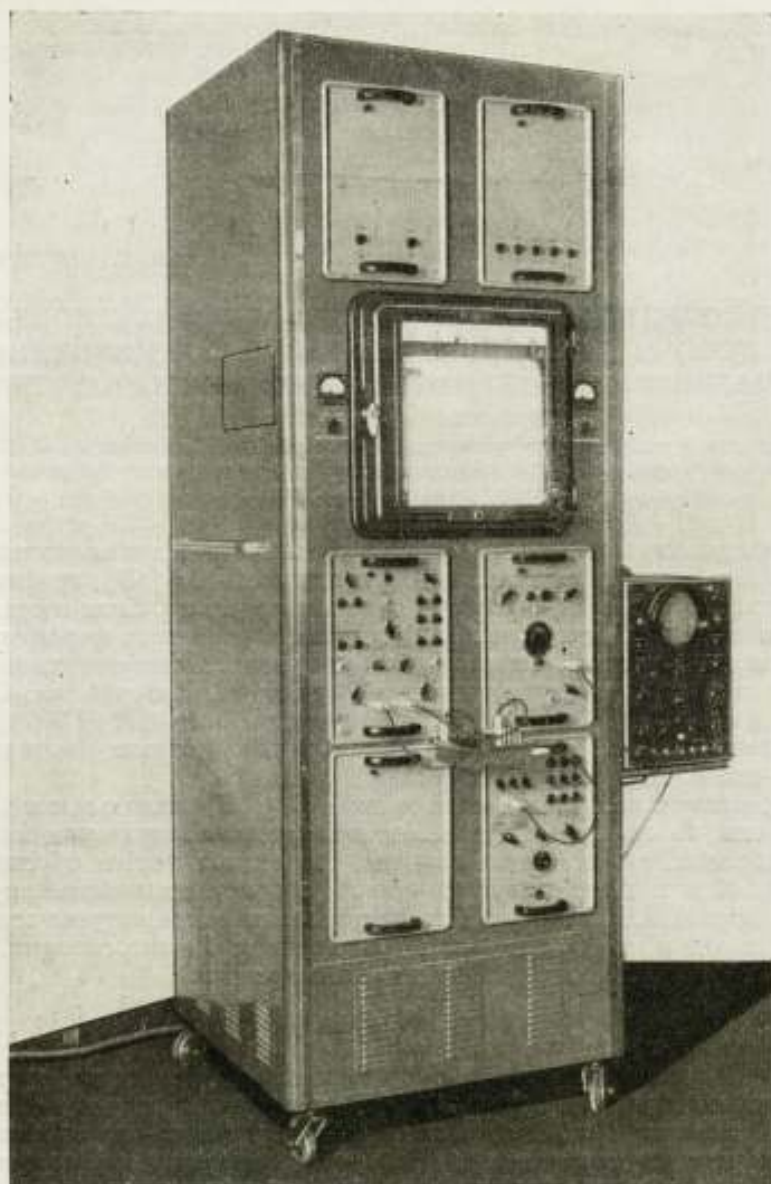


Рис. 1. Внешний вид установки ДСШУ-М.

вания, в силу чего приборы для их измерений должны иметь низкий уровень линейных искажений. По некоторым данным [1] для снижения погрешности электронно-лучевого феррографа до 1—2% полоса частот его каналов должна заключаться между $\frac{1}{300}$ и $300f$, где f — частота намагничивающего тока. Различие же в частотно-фазовых характеристиках каналов не должно превосходить $\pm 1^\circ$.

Результаты электрического интегрирования, осуществляемого с помощью цепочек $R-C$, принципиально зависят от частоты интегрируемого сигнала; поэтому интегрирующие элементы, имеющие малые погрешности в широком диапазоне частот, значительно усложняют схему и эксплуатацию прибора.

Существенное значение имеют нелинейные искажения. При использовании в качестве индикатора электронно-лучевой трубки с фотоприставкой суммарные погрешности, ввиду нелинейности выходных каскадов усилителя и электронно-оптических искажений, достигают 7—8%.

Указанными причинами и объясняется тот факт, что большинство распространенных в настоящее время приборов для наблюдения и измерения петель гистерезиса ферромагнитных материалов в динамическом режиме обладает погрешностями порядка 10—12% и используется для целей сравнения.

Основным отличием установки ДСШУ-М, внешний вид которой показан на рис. 1, от указанных приборов являются значительно меньшие погрешности измерений петли при сохранении высокой чувствительности и сравнительно широком диапазоне рабочих частот.

Работа установки основана на принципе стробоскопического осциллографирования. Этот принцип пояснен на рис. 2.

Исследуемый сигнал (кривая a) с помощью синхронного ключа, момент открывания которого изменяется в пределах периода сигнала (кривая b), преобразуется в последовательность импульсов (кривая $в$); амплитуда импульсов меняется в соответствии с формой сигнала; первоначальная форма сигнала восстанавливается (кривая $г$), причем период преобразованного сигнала оказывается во столько раз больше первичного, во сколько период первичного сигнала больше величины Δt , называемой в дальнейшем шагом считывания. Частота открывания синхронного ключа может быть в целое число раз меньше частоты сигнала; тогда, при неизменном шаге считывания, во столько же раз увеличивается период преобразованного сигнала.

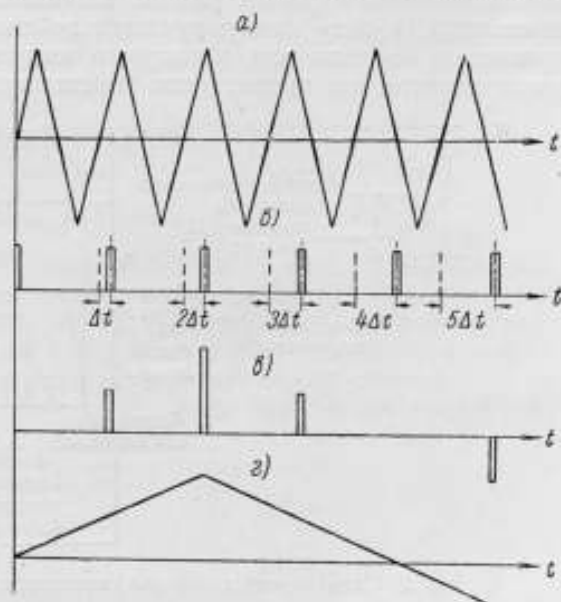


Рис. 2. Характер преобразования сигналов при стробоскопическом осциллографировании.

Преобразователь (рис. 3, а) обычно представляет собой запертую электронную лампу, которая открывается узкими, так называемыми затворными импульсами, подаваемыми на один из ее электродов. Исследуемый сигнал U_c подается на другой электрод. В анод лампы включена цепь, состоящая из параллельного соединения активного сопротивления R_a и емкости C_a . В момент отпирания лампы затворным импульсом емкость, заряженная до потенциала анодного питания, разряжается (рис. 3, б) через выходное сопротивление лампы. Глубина разряда емкости при одной и той же длительности затворного импульса зависит от мгновенного значения напряжения на сигнальном электроде лампы. Длительность импульсов, возникающих в анодной цепи преобразователя, в силу интегрирующего действия емкости C_a , значительно превышает длительность затворного импульса. Энергия сигнала резко увеличивается, что существенно упрощает дальнейшее усиление и вос-

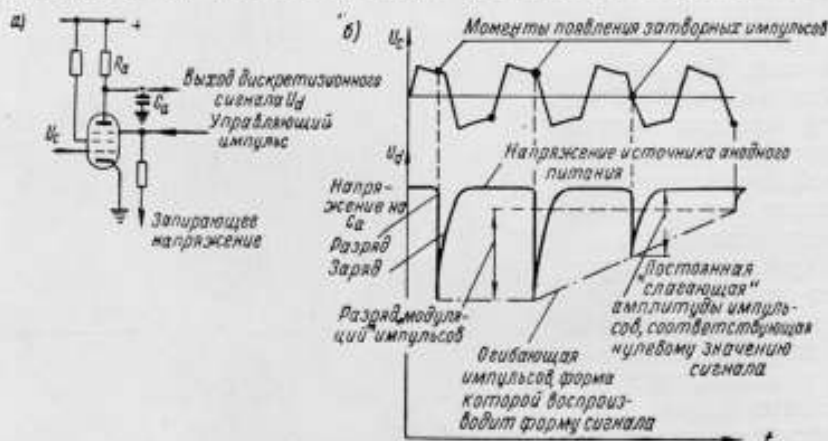


Рис. 3. Схема преобразователя сигналов и диаграмма его действия.

становление формы сигнала в новом временном масштабе. Максимально допустимое увеличение длительности выходных импульсов в преобразователе и последующих каскадах усиления ограничивается тем, что соседние импульсы не должны заметно перекрываться. При соблюдении этого условия амплитуда каждого импульса будет определяться только очередным мгновенным значением сигнала.

Основной эффект стробоскопического преобразования состоит в существенном понижении скорости процесса без заметного изменения его формы. Коэффициент понижения или, как его иногда называют, трансформации времени может быть практически любым, в том числе и таким, который позволяет записывать скоростные сигналы на бумажную ленту обычного электронного потенциометра. Погрешность потенциометра, как правило, примерно на порядок ниже, чем погрешность электронно-лучевой трубки с фотоприставкой, а линейная чувствительность — на три порядка выше. В сумме это снижает коэффициент нелинейных искажений прибора до 1—2%.

Второй особенностью стробоскопического преобразования является то, что канал преобразованного сигнала в рабочей полосе частот не вносит фазовых сдвигов [2].

Наконец, описываемый метод дает возможность осуществить электрическое интегрирование сигнала после преобразования. При условии, что период преобразованного сигнала будет всегда постоянным, исключаются частотные погрешности интегрирования.

Таким образом, применение принципа стробоскопического осциллографирования для измерения кривых намагничивания в динамическом режиме позволяет исключить или существенно снизить линейные и нелинейные искажения, а вместе с ними — и погрешности воспроизведения петли.

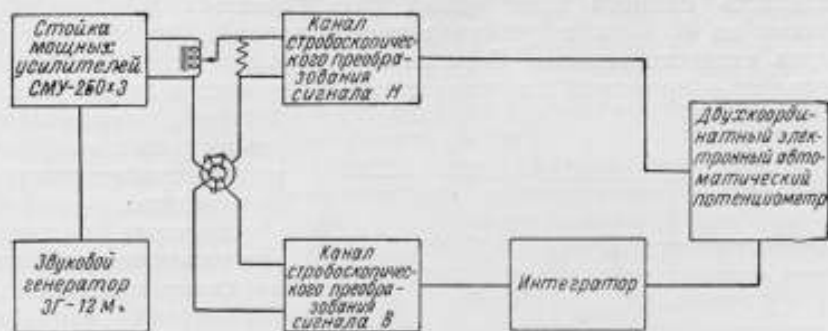


Рис. 4. Блок-схема установки.

Рассмотрим блок-схему установки ДСШУ-М (рис. 4). Первичная обмотка испытуемого образца питается выходным напряжением типового мощного усилителя СМУ-250×3, возбуждаемого звуковым генератором типа ЗГ-12М. Сигналы, снимаемые с образцового сопротивления в 1 ом, включенного последовательно с первичной обмоткой, и со вторичной обмотки образца, подаются на входы преобразовательно-уси-

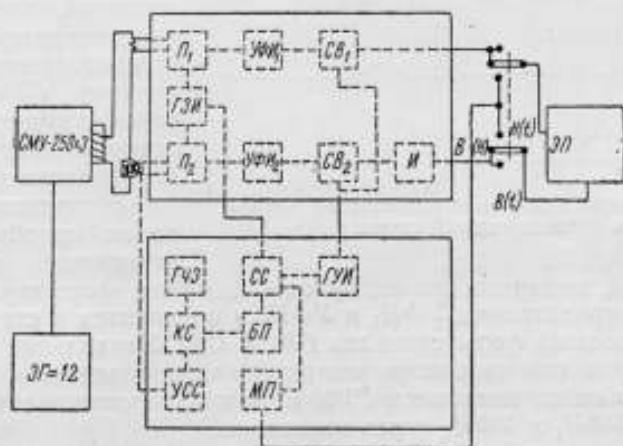


Рис. 5. Функциональная схема установки.

лительных каналов. Выходное напряжение мощного усилителя подается также на вход блока хронизатора, который генерирует, синхронизирует и сдвигает во времени затворный импульс. На выходе канала В включен типовой интегратор И (рис. 5), заимствованный из электронно-счетной машины МПТ-9М. Выходы интегратора и канала А поданы на оси вертикального и горизонтального отклонений двухкоординатного электронного потенциометра типа ЭП-2К-01.

Функциональная схема установки представлена на рис. 5. Ее работа протекает следующим образом. Генератор частоты затворных импульсов ГЧЗ выдает специальный «разрешающий» импульс, отпираю-

щей ключевую схему *КС*. Последняя пропускает на вход генератора быстрого пилообразного напряжения *БП* синхронизирующие импульсы, сформированные из синусоидального напряжения усилителем синхросигнала *УСС*. Импульсы по частоте и фазе жестко связаны с входными сигналами. Первый из этих импульсов запускает схему генератора *БП*; длительность прямого хода может регулироваться в пределах от 100 мксек до 40 мсек и устанавливается равной длительности двух периодов входного сигнала. С окончанием прямого хода быстрого пилообразного напряжения ключевая схема запирается и до прихода следующего «разрешающего» импульса от *ГЧЗ* вторичное срабатывание *БП* невозможно.

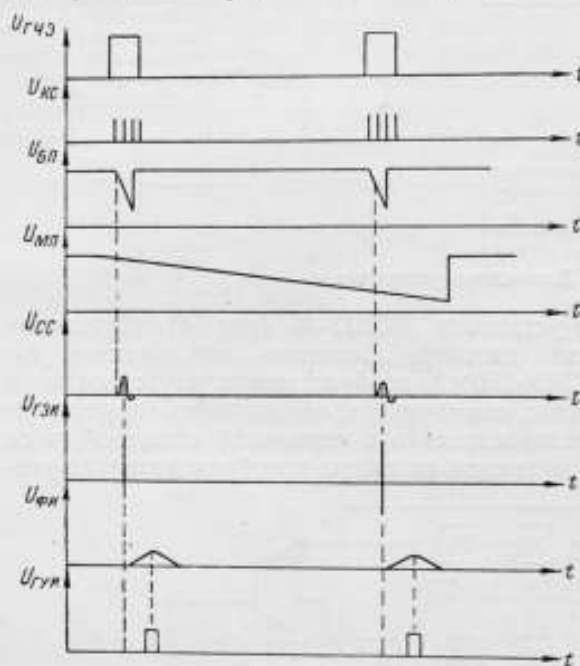


Рис. 6. Временные диаграммы напряжений элементов функциональной схемы.

ных значений, поданных на их выходы сигналов, формируются усилителями-формирователями *УФИ*₁ и *УФИ*₂ и подводятся к схемам восстановления исходных форм сигналов *СВ*₁ и *СВ*₂. Управление последними осуществляется специальными импульсами, подаваемыми от генератора управляющих импульсов *ГУИ* в момент прохождения импульсов на выходах *УФИ*₁ и *УФИ*₂ через максимум.

Схемы восстановления «запоминают» максимальные значения входных импульсов (пропорциональные считанным значениям входных сигналов) до прихода следующего управляющего импульса. Таким образом, на выходе получается ступенчатый сигнал, огибающая которого соответствует форме исходного сигнала, но уже в другом временном масштабе.

На рис. 6 приведены временные диаграммы напряжений, поясняющие работу элементов функциональной схемы. Наличие в установке интегратора с очень большой эквивалентной постоянной времени (около $4 \cdot 10^4$ сек) вносит в ее работу некоторую специфику. Дело в том, что результаты интегрирования преобразованного сигнала зависят не только от формы сигнала, но и от начальных условий интегрирования. Так, например, если сигнал, вследствие асимметрии амплитудной характери-

дующего «разрешающего» импульса от *ГЧЗ* вторичное срабатывание *БП* невозможно.

Быстрое пилообразное напряжение подается на схему сравнения *СС*. На второй вход этой схемы поступает медленное пилообразное напряжение *МП* с длительностью прямого хода около 170 сек, включаемое одновременно с процессом записи. Когда оба пилообразных напряжения проходят через равные значения, схема сравнения дает импульс запуска генератора затворных импульсов *ГЗИ*, который вырабатывает затворный импульс, поступающий на преобразователи *П*₁ и *П*₂.

Напряжения на выходах преобразователей, зависящие от мгновен-

стики канала, содержит постоянную слагающую, то это приведет к тому, что конец записанной кривой не сойдется с ее началом, причем знак расхождения будет зависеть от знака асимметрии. Аналогичная картина будет иметь место, если запись начнется не от нулевого значения сигнала, а с какой-либо произвольной точки. Перед началом записи необходимо тщательно балансировать «нуль» выходного напряжения и «нуль» самого интегратора. Кроме того, как уже указывалось, для исключения частотной погрешности интегрирования необходимо, чтобы на прямом ходу генератора медленной пилы всегда развевывались точно два периода исследуемого сигнала.

Перечисленные особенности потребовали введения некоторых дополнительных регулировок, а также выполнения генератора медленного пилообразного напряжения в виде прецизионного

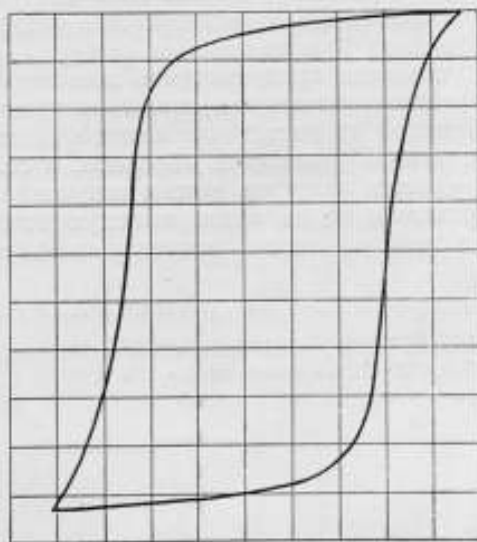
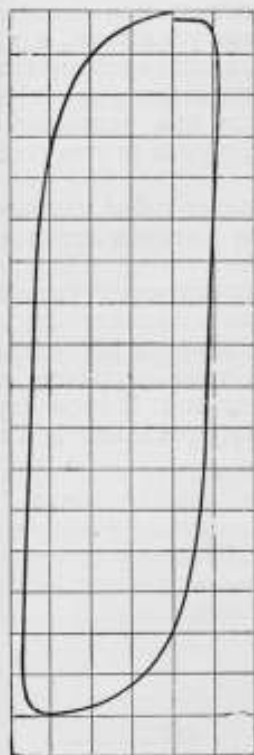


Рис. 7. Образцы записей кривых намагничивания, полученных на установке ДСШУ-М.

потенциометра, вращающегося от электромотора и имеющего ручную подстройку. Высокая чувствительность установки (напряжение 1 мВ соответствует примерно одному сантиметру отклонения пера) привела к необходимости применения балансных преобразователей и усилителей, цепи накала которых пришлось питать выпрямленным стабилизированным напряжением с малой пульсацией. Для облегчения пересчетов масштаба получаемых кривых в единицы магнитных измерений установка снабжена калибровочными таблицами.

Расчеты и эксперименты показывают, что суммарная погрешность измерений установки колеблется в пределах от ± 2 до $\pm 4\%$ в зависимости от условий измерения и измеряемого параметра.

Диапазон рабочих частот заключен между 50 гц и 20 кгц. Эквивалентная ширина полосы каналов установки с учетом инерционности самописца составляет около 1 Мгц.

На рис. 7, а и б приведены образцы записей различных кривых намагничивания, получаемых на установке.

В заключение необходимо остановиться на вопросе, не имеющем отношения к существу описанной установки, но играющем довольно важную роль в процессе магнитных измерений. Речь идет о параметрах источника намагничивания. Как уже указывалось, в качестве такового был выбран типовой мощный усилитель СМУ-250×3. Усилитель состоит из трех одинаковых блоков мощностью 250 *ва* каждый. Благодаря глубокой противосвязи, охватывающей каналы усилителя от выхода до входа, эквивалентное внутреннее сопротивление каждого блока колеблется около 1 *ом*. Блоки могут включаться параллельно или последовательно, смотря по условиям испытания. На выходе усилителя, в качестве основного регулятора напряжения, включен автотрансформатор ЛАТР-1. Выходное напряжение может регулироваться от 0 до 360 *в*. Коэффициент нелинейных искажений усилителя при нормальной нагрузке около 1%. Соотношение уровней сигнала и шумов (в том числе и фона питания) составляет около 70 *дб*.

Таким образом, усилитель СМУ-250×3 представляет собой удобное, гибкое и сравнительно экономичное устройство для питания испытываемых образцов при различных режимах измерений.

В установке предусмотрено дополнительное фильтрующее устройство, предназначенное для снижения уровня фона по координате *H*.

Несмотря на достаточно малое выходное сопротивление источника, при испытании некоторых образцов, в особенности типа ферритов, не всегда удается получить режим синусоидальной индукции. В этом случае, принимая во внимание высокую точность интегрирования, можно пользоваться обычными расчетными формулами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lord X. U., AIEE Transaction, v. 72, 1953, p. 1.
2. Вол В. А., «Радиотехника», № 8, 1958.

П. П. МАРКИН, И. И. ПЕККЕР

УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье описывается установка, основанная на осциллографическом методе измерений, предназначенная для определения кривой намагничивания и потерь в полосовых и тороидальных образцах.

В последнее время было предложено несколько установок для контроля свойств листовой электротехнической стали на целых листах [1—4].

Однако снятие магнитных характеристик только на целых листах не всегда целесообразно. При изготовлении мелких трансформаторов магнитных усилителей, электрических машин малой мощности и т. п. ширина деталей магнитопровода достигает нескольких десятков миллиметров и менее. Для того чтобы получить магнитные характеристики

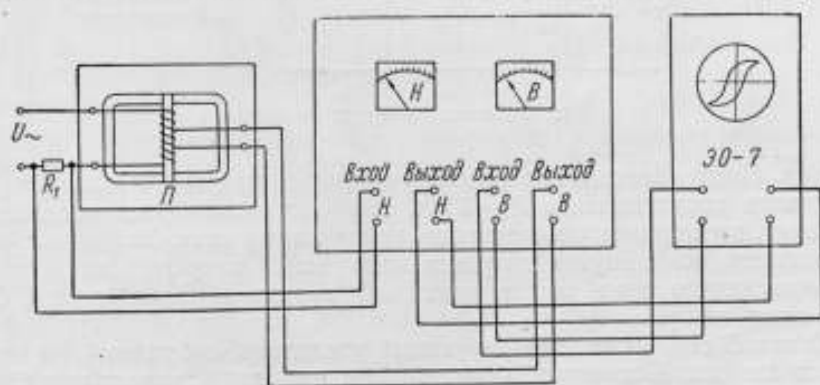


Рис. 1. Блочная схема установки для испытания магнитномягких материалов.

на образцах тех же размеров, что и детали магнитопроводов, желательно иметь специальную установку.

Предлагаемая установка позволяет сравнительно просто и при малой затрате времени и металла определить магнитные характеристики как полосовых, так и тороидальных образцов.

При испытании полосовых образцов для проведения измерений достаточно 5—10 пластин шириной 30 мм, длиной 250 мм и толщиной 1—0,1 мм.

Как видно из блочной схемы (рис. 1), установка состоит из пермеаметра, применяемого при испытании полосовых образцов, электронного блока и осциллографа типа ЭО-7.

Пермеаметр Π изготовлен из двух половин яра общим сечением около 20 см^2 , т. е. индукция в яре примерно в 20 раз меньше индукции в образце (сечение образца около 1 см^2), и на преодоление магнитного сопротивления яра требуется не более 0,1% общей намагничивающей силы.

Намагничивающая катушка содержит 800 витков провода ПВД диаметром 1,6 мм, что позволяет получить напряженность поля до

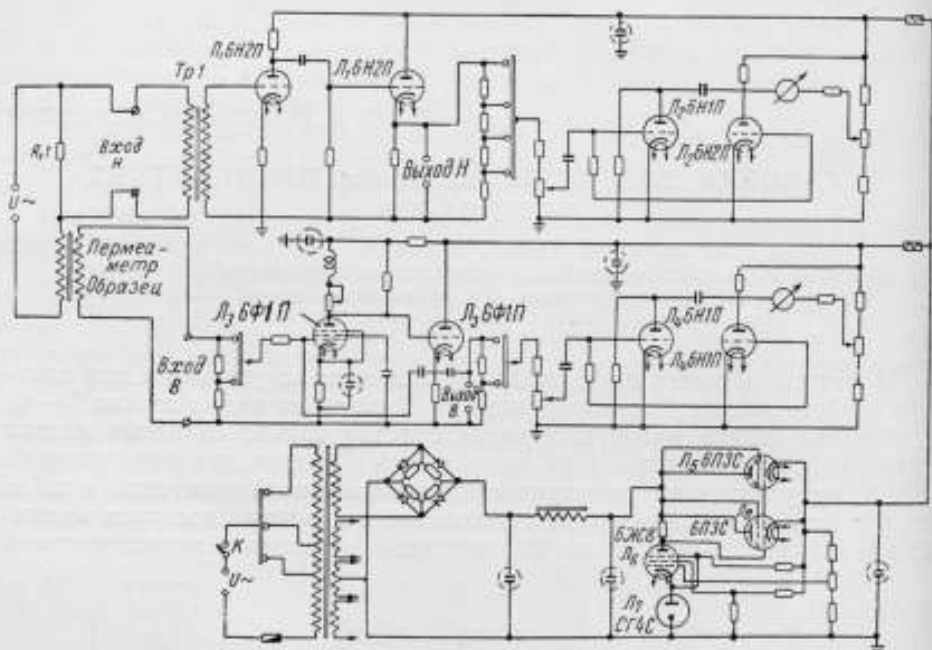


Рис. 2. Схема электронного блока.

500 а/см. Последовательно с намагничивающей катушкой включено безреактивное сопротивление $R_1 = 1 \text{ ом}$, с которого снимается падение напряжения, пропорциональное намагничивающему току. Зависимость напряженности поля внутри катушки, измеренной катушкой поля, от намагничивающего тока имеет линейный характер. Электронный блок изображен на рис. 2.

Канал B содержит интегрирующий усилитель, собранный на электронных лампах. Погрешность интегрирования для промышленной частоты получается очень малой. Сопротивлением R_{23} устанавливается определенный коэффициент усиления по вертикали. На выходе усилителя поставлен катодный повторитель на Λ_3 , что обеспечивает стабильность работы усилителя и позволяет осуществлять плавную регулировку выходного напряжения. Сопротивление выхода не более 1 ком.

С катодного повторителя напряжение, пропорциональное индукции B , подается на вертикальные отклоняющие пластины осциллографа и на пиковый вольтметр, выполненный на лампе Λ_4 типа 6Н1П. Вольтметр собран по мостовой схеме, в одно плечо которой включено внутреннее сопротивление лампы. В измерительную диагональ включен магнитоэлектрический измеритель типа М-24 на 100 мка.

Подобные схемы обеспечивают малую зависимость показаний от изменения напряжения питания и температуры. Входное сопротивление вольтметра велико и составляет около 10 *Мом*, поэтому оно не оказывает влияния на входное сопротивление осциллографа. Зависимость показаний пикового вольтметра от входного напряжения линейна на протяжении всей шкалы, за исключением 5—10% от ее начала. График зависимости $\alpha = f(U_{вх})$ носит прямолинейный характер в широком диапазоне частот. Канал *B* имеет два предела измерения 0—10 000 *гс* и 0—20 000 *гс*. Изменение пределов измерения производится при помощи переключателя.

Канал *H* содержит входной трансформатор *Tr-1*, первая обмотка которого электрически изолирована от корпуса прибора, и однокаскадный усилитель, выполненный на лампе *Л₁* типа 6Н2П, обеспечивающий коэффициент усиления около 40. На выходе усилителя включен катодный повторитель аналогично каналу *B*. На выходе катодного повторителя поставлен делитель напряжения. Верхние пределы измерения канала *H* следующие: 5, 10, 50 и 100 *а/см*.

С выхода катодного повторителя напряжение подается на горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа и на пиковый вольтметр канала *H*.

Методика измерения следующая. На пакет испытуемой стали наносится измерительная обмотка, состоящая из 50 витков провода ПЭЛ-0,2 при сечении образца, равном 1 *см²*.

Если сечение образца отличается от 1 *см²*, то подбирают такое количество витков, чтобы $\omega_2 S$ равнялось 50, т. е. градуировочному. Измерительная катушка включается на клеммы «вход *B*» электронного блока.

Устанавливая различные значения намагничивающего тока, контролируемые по стрелочному прибору *H*, отмечают значения магнитной индукции по другому прибору *B* (рис. 1). Показания прибора соответствуют вершинам частных циклов гистерезиса.

При измерении потерь для заданной индукции на экране осциллографа получают максимально возможное (без искажений) изображение петли гистерезиса.

Масштабы кривой легко определяются по показанию стрелочных приборов. Площадь динамической петли гистерезисного цикла определяет величину полных потерь в стали, которые подсчитываются по известной формуле.

Градуировка прибора может быть произведена по вольтметру средних значений или другим каким-либо методом.

Результаты измерений, полученные с помощью этой установки, сравнивались с результатами измерений, проведенных на баллистической установке и установке с вольтметром средних значений. Сравнения показали, что погрешность установки при определении основной кривой намагничивания не превышает 5%, а при определении потерь — несколько выше, но не более 7—10%.

Преимуществом описываемой установки является: удобство и простота обслуживания, малый расход металла для контрольных образцов, простота конфигурации образцов при испытании в пермеетре, возможность проведения измерений в цеховых условиях при относительно малой затрате времени. Упрощение пользования установкой и повышение точности измерения в значительной степени обусловлено применением на выходе стрелочных указателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дружинин В. В., Зубов Ю. Е., Кожуров А. А., Янус Р. И., «Вестник электропромышленности», № 7, 1958.
 2. Вдовин Ю. А., Аппараты для контроля и сортировки целых листов электротехнической стали, ГЭИ, 1958.
 3. Кутяшов В. А., «Известия вузов СССР». Серия «Электромеханика», № 4, 1958.
 4. Кифер И. И., Пантюшин В. С., Испытание ферромагнитных материалов, ГЭИ, 1955.
-

Т. И. ВАСЮТКИНА, В. М. ЮРЧЕНКО

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРИТОВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ В КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В статье рассматривается установка, предназначенная для визуального наблюдения с помощью электронного осциллографа и определения параметров петли гистерезиса ферритовых сердечников в квазистатическом режиме.

Широкое использование ферритов в технике счетно-решающих и других автоматических устройств вызвало необходимость в разработке целого ряда измерительных приборов для определения магнитных параметров ферритов.

Ряд важных параметров, характеризующих свойства магнитных материалов, может быть определен по петле гистерезиса, снятой в статическом или квазистатическом режиме.

Для снятия петли гистерезиса наиболее часто применяется баллистический метод измерения [1], недостатками которого являются: большая затрата времени (примерно несколько часов) на снятие петли гистерезиса одного исследуемого образца и недостаточная чувствительность метода, особенно при измерении ферритовых сердечников малого размера.

За последние годы в зарубежной литературе появился ряд статей, освещающих вопрос измерения ферритов в квазистатическом режиме с применением фотооптических усилителей.

В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются фотооптические усилители различных марок (разработки завода «Вибратор») [2].

Выпуск этих приборов значительно облегчил решение вопроса автоматического снятия петли гистерезиса в квазистатическом режиме.

Фотооптический усилитель дает возможность получить усиление медленно изменяющегося сигнала больше чем в 10^6 раз.

Большой коэффициент усиления позволяет использовать фотооптический усилитель для снятия петли гистерезиса сердечников малого размера с измерительной обмоткой, состоящей из нескольких витков.

В связи с использованием в технике АТС и дальней связи большого количества ферритовых сердечников малого размера встал вопрос о создании измерительной установки, с помощью которой можно было бы быстро и с достаточной точностью получить петлю гистерезиса в квазистатическом режиме.

В Научно-исследовательском институте городской и сельской телефонной связи разработана измерительная установка для определения параметров ферритовых сердечников, используемых при разработке автоматических телефонных станций [3]. Установка дает возможность получать петли гистерезиса любой формы в квазистатических полях. Блок-схема разработанной установки представлена на рис. 1. На испытываемый сердечник наматывают две обмотки: намагничивающую *I* и измерительную *II*. Последовательно с намагничивающей обмоткой включено сопротивление R_1 . Намагничивающий ток создает на этом со-

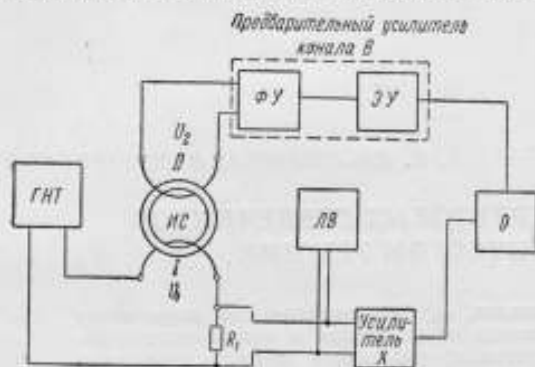


Рис. 1. Блок-схема установки.

противлению падение напряжения, пропорциональное напряженности магнитного поля в измеряемом образце.

Это напряжение усиливается усилителем *X* и подается на горизонтально-отклоняющие пластины осциллографа. В качестве источника намагничивающего тока разработан генератор *ГНТ*, частота которого может изменяться от долей герца до нескольких герц. Напряжение U_2 на

зажимах измерительной обмотки, после усиления и интегрирования подается на вход *Y* осциллографа. Для получения большого усиления постоянного напряжения и визуального наблюдения петли гистерезиса в установке применено сочетание фотоэлектронного усилителя *ФУ*, электронного усилителя *ЭУ* и электронно-лучевого осциллографа типа ЭНО-1. В схеме фотоэлектронного усилителя предусмотрено интегрирование напряжения, снимаемого с измерительной обмотки, и схема термокомпенсации с целью получения одинаковых результатов измерения при изменении окружающей температуры.

Напряжение, полученное на выходе усилителя и пропорциональное магнитной индукции образца, подается на вход *Y* осциллографа. Петля гистерезиса исследуемого сердечника и ее параметры определяются с помощью изображения, полученного на экране электронно-лучевого осциллографа с применением соответствующего масштаба. Принципиальная схема установки изображена на рис. 2. Ниже рассматривается работа отдельных узлов принципиальной схемы.

Для создания медленно изменяющегося по величине и направлению магнитного поля используется генератор намагничивающего тока. Этот генератор представляет собой торoidalный делитель напряжения, скользящий контакт которого вращается с помощью мотора *M*. Скорость вращения скользящего контакта может быть регулирована в пределах $0,5 \div 2$ об/сек. В качестве источника тока, подведенного к торoidalному реостату, включенному потенциометрически, используется стационарная батарея с напряжением ± 24 в.

Генератор намагничивающего тока способен давать ток не более 2 а при нагрузке в 1 ом.

Сигнал, пропорциональный напряженности магнитного поля в образце, снимается с измерительного сопротивления $R_{23} = 1$ ом и подается на вход усилителя канала *H*. Усилитель канала *H* аналогичен по схеме усилителю вертикального отклонения осциллографа ЭНО-1, что суще-

ственно для правильной работы схемы, так как оба усилителя должны иметь одинаковые амплитудно-частотные характеристики. В усилителе канала H имеются: регулирование чувствительности, коррекция нуля усилителя постоянного тока и регулирование смещения луча по горизонтали.

Остановимся кратко на схеме усилителя канала B и фотооптического усилителя.

Измерительная обмотка исследуемого образца подключается к зажимам гальванометра, входящего в состав фотооптического усилителя через сопротивление обратной связи R . Э. д. с., действующая в этой цепи, равна разности между напряжением, возникающим на зажимах измерительной обмотки при изменении магнитной индукции в образце e_x , и напряжением обратной связи $e_{o.c.}$. Эта э. д. с. создает в цепи гальванометра ток I , который, проходя по обмотке гальванометра, вызывает поворот зеркальца на некоторый угол. При повороте зеркальца гальванометра, освещенного лампой OL через оптическую систему OC , происходит перемещение светового луча по поверхности фотосопротивлений ΦC_1 и ΦC_2 .

Сопротивление фотоэлементов изменяется, и происходит перераспределение приложенного к ним напряжения. Возникающая при этом разность напряжений подается на вход предварительного электронного усилителя. Ток на выходе усилителя изменяется до величины, при которой компенсируется через цепь отрицательной обратной связи изменение напряжения (например, на зажимах измерительной обмотки). Обратная связь осуществляется с помощью цепочки RC .

Помимо обеспечения необходимого коэффициента передачи, электронный усилитель обеспечивает согласование высокоомного выходного сопротивления моста фотосопротивлений с низкоомной компенсационной цепью.

В качестве нагрузки выходного каскада усилителя выбрано сопротивление $R_{10} = 30$ ком. Напряжение на выходе электронного усилителя, необходимое для получения на экране осциллографа изображения с размахом на половину экрана, выбирается равным 3 в. В этом случае ток в нагрузке будет равен 1 ма. Чтобы устранить влияние этого тока на режим работы выходного каскада усилителя, ток через выходную лампу выбирается значительно больше тока через нагрузку. В качестве лампы выходного каскада используется двойной триод 6Н1П, обеспечивающий коэффициент передачи, равный 0,8. В качестве усилительной лампы первого каскада выбран пентод 6Ж1ПЕ, работающий при анодном напряжении 55 в и обеспечивающий коэффициент усиления, равный 38.

Для получения напряжения, пропорционального магнитной индукции, в схеме используется цепочка $R_{25}C_3$, выполняющая функцию интегрирования.

Высокий коэффициент усиления, получаемый в результате использования фотоэлектрооптического усилителя, приводит к тому, что на режиме работы усилителя сказываются возникающие в различных частях схемы т. э. д. с., которые приводят к разбалансировке мостовой схемы усилителя. Для устранения влияния т. э. д. с. применена схема компенсации, которая питается от постороннего источника напряжением 1,5 в. Делитель R_{20} служит для грубого регулирования, а R_{22} — для плавного. Для выравнивания фазы каналов B и H перед осциллографом включены специально разработанные для этого фазокорректирующие четырехполюсники Φ_1 и Φ_2 .

Разработанная установка имеет следующие технические характеристики:

1. Диапазон измерительных частот $0,5-2$ гц; изменение частоты возможно с интервалом $0,1$ гц.

2. Установка рассчитана для получения гистерезисной петли тороидальных ферритовых сердечников визуальным способом; размеры среднего диаметра измеряемого сердечника могут быть в пределах от $3,0$ до 40 мм.

3. Максимальное значение напряженности магнитного поля $H = 2,5$ э.

4. Максимальное значение намагничивающего тока равно $2a$.

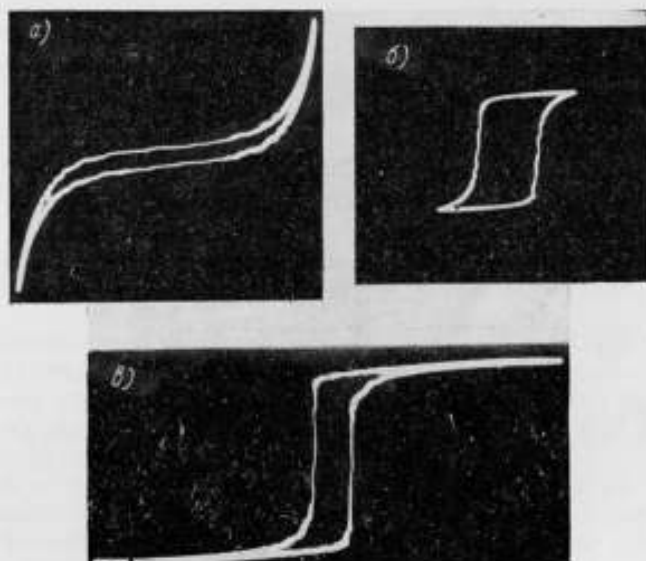


Рис. 3. Осциллограммы гистерезисных петель тороидальных образцов:

a — средний диаметр $1,06$ см; $H = 2$ э; $B = 2070$ гс; *б* — средний диаметр $0,33$ см, $H = 2$ э; $B = 2500$ гс; *в* — средний диаметр $0,33$ см; $H = 2$ э; $B = 2500$ гс.

5. Максимальное значение магнитной индукции $B = 2500$ э.

6. Измерение параметров магнитного материала производится по изображению петли на экране электронно-лучевой трубки при помощи градуированной сетки. Сетка градуируется по «эталонному» сердечнику (измеренному на баллистической установке).

7. В установке предусмотрена возможность фотографирования гистерезисных петель.

8. Погрешность измерения на разработанной установке соответствует погрешности измерения на баллистической установке.

Эксплуатация разработанной в НИИТС установки подтвердила бесспорные преимущества ее перед баллистической установкой, которые выражаются в возможности визуального получения петли гистерезиса для различных ферритов и возможности измерения сердечников малых размеров $d_{ср} = 1$ мм и выше с точностью измерения на баллистической установке и малом времени, затрачиваемом на получение результатов измерения. Это время в десятки, а иногда и в сотни раз меньше, чем при измерении на баллистической установке.

На рис. 3 приведены осциллограммы гистерезисных петель, полученные в квазистатическом режиме тороидальных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васюткина Т. И., Эбанаидзе Е. В., Сборник трудов НИИТС, № 6, 1960.
2. Готовский И. Г., «Измерительная техника», № 1, 1960.
3. Васюткина Т. И., Мамонтов Е. Д., Юрченко В. М., Сборник трудов НИИТС, № 6, 1960.

О. А. ГЕРАЩЕНКО, П. И. ДЕХТЯРЕНКО,
В. П. КАРПЕНКО

АНАЛИЗ СХЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО КАЛОРИМЕТРА

В статье дается теоретическое обоснование работы различных схем автоматического регулирования дифференциального калориметра.

Калориметрический метод измерения потерь в ферромагнитных материалах отличается высокой точностью и малой зависимостью результатов измерений от частоты. Это качество очень ценно при измерениях потерь на высоких частотах, где другая аппаратура не может обеспечить достаточной точности измерений.

Основным недостатком калориметрических установок является длительность измерений, что ограничивает их применение узкими рамками лабораторно-исследовательских условий. В связи с этим вопрос автоматизации процесса измерений при помощи калориметра приобретает весьма большое значение.

В настоящей статье рассматриваются автоматические схемы в применении к дифференциальному калориметру, обеспечивающему высокую чувствительность и точность измерений.

Если две дифференциальные системы имеют одинаковые теплоемкости и одинаковые коэффициенты теплопередачи k , то при подведении к ним равных тепловых мощностей системы нагреваются до одинаковых значений температур теоретически в крайне малый промежуток времени. Метод измерений основан на том, что по известной мощности в одной из систем может быть определена неизвестная, подводимая во вторую систему.

Как известно, общая энергия, подводимая к одной системе, расходуется на нагрев системы, а часть ее теряется за счет охлаждения

$$Pdt = \sum_{i=1}^n m_i c_i d\theta + kS(\theta_n - \theta_1) dt, \quad (1)$$

где C — мощность, выделяемая в сосуде калориметра;

$\sum_{i=1}^n m_i c_i$ — интегральная теплоемкость одной системы;

k — коэффициент теплопередачи системы;

S — поверхность охлаждения системы калориметра;

$d\theta$ — приращение температуры системы за время dt ;

θ_n — температура системы в момент времени t ;
 θ_1 — температура окружающей среды.

Измерения производятся в начальный период времени, когда кривая нагрева прямолинейна и вторым членом в правой части уравнения можно пренебречь.

Поскольку в промышленных условиях потери в сердечниках, применяемых в аппаратуре, работающей при повышенных и высоких частотах, составляют доли и единицы ватт, то температура нагрева системы при испытании этих образцов измеряется в долях и единицах градуса; поэтому общую теплоемкость системы можем считать постоянной, независящей от температуры.

При принятых допущениях мощность потерь определится из уравнения (1) так

$$P = \sum_{l=1}^n m_l c_l \frac{d\theta}{dt}, \quad (2)$$

т. е. в рассматриваемых условиях мощность потерь, выделяемая в сосуде калориметра, пропорциональна скорости изменения температуры в этом сосуде во времени (короче, пропорциональна производной температуры системы по времени).

Уравнение (2) можно написать в виде:

$$\theta' = \alpha P, \quad (3)$$

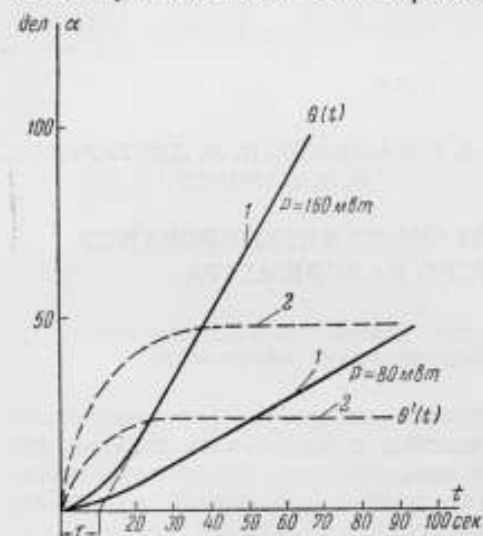


Рис. 1. Динамические характеристики (кривые разгона) калориметра — объекта регулирования.

где $\theta' = \frac{d\theta}{dt}$;

$$\alpha = \frac{1}{\sum_{l=1}^n m_l c_l} \text{ — коэффициент пропорциональности.}$$

Изменение температуры калориметра $\Delta\theta$ за время Δt определяется уравнением

$$\Delta\theta = \theta' \Delta t, \quad (4)$$

Предположение о пренебрежимо малом влиянии теплопередачи в окружающую среду справедливо лишь для начальных 15—30 мин работы установки. В дальнейшем система прогревается настолько, что теплопередача составляет существенную долю в тепловом балансе.

В связи с этим должна быть предусмотрена возможность приведения системы к начальным условиям, например, путем автоматической смены масла в калориметрах после ряда произведенных измерений.

Рассмотрим дифференциальный калориметр как объект автоматического регулирования. На рис. 1 изображены динамические характеристики дифференциального калориметра (кривые разгона), представляющие собой изменение температуры одного из сосудов во времени при выделении в нем определенной тепловой мощности.

Сплошными 1 линиями показано нарастание температуры в сосуде при мощностях 80 и 160 мвт. Пунктирными 2 — изменение во

времени производной температуры для тех же значений мощности.

По кривым рис. 1 видно, что дифференциальный калориметр как объект автоматического регулирования может рассматриваться с точки зрения одной из двух регулируемых величин — скорости изменения температуры (производной температуры во времени) $\theta'(t)$, либо температуры $\theta(t)$. Из рис. 1 видно, что дифференциальный калориметр как объект автоматического регулирования с регулируемой величиной производной температуры является инерционным статическим звеном первого порядка и описывается дифференциальным уравнением в операторной форме.

$$(\tau p + 1)\theta' = \alpha P, \quad (5)$$

где τ — постоянная времени;

α — коэффициент усиления (пропорциональности) объекта;

P — разностная мощность обоих сосудов (компенсационного и рабочего) дифференциального калориметра;

$\theta' = \frac{d\theta}{dt}$ — скорость изменения температуры во времени (производная температуры).

Если считать регулируемой величиной температуру, то дифференциальный калориметр является астатическим инерционным звеном первого порядка и описывается дифференциальным уравнением в операторной форме

$$(\tau p + 1)p\theta = \alpha P, \quad (6)$$

где θ — разностная температура двух сосудов дифференциального калориметра.

Соответственно вышеизложенному могут быть предложены два типа систем автоматизации дифференциального калориметра: системы с регулированием по производной температуры и системы с регулированием по температуре.

Рассмотрим кратко различные системы автоматического дифференциального калориметра с регулированием как по производной, так и по температуре.

Принципиальная схема автоматического дифференциального калориметра с регулированием по производной температуры приведена на рис. 2. Система работает следующим образом: разностный сигнал батарей термопар

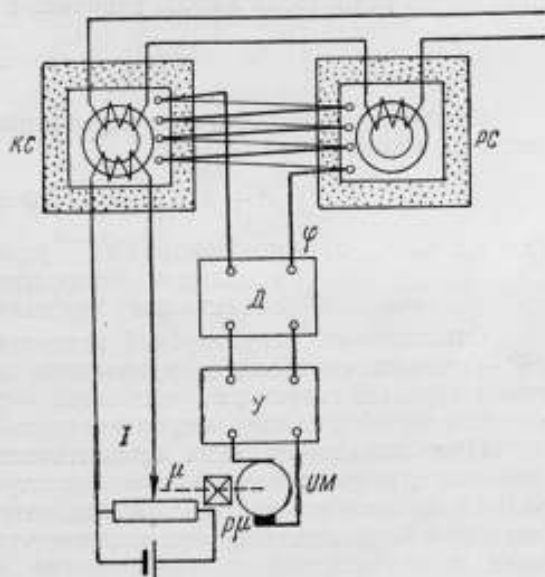


Рис. 2. Схема автоматического дифференциального калориметра АДК непрерывного действия с регулированием по производной температуры (скорости изменения температуры).

$$\varphi = \Psi - \Phi,$$

(где Ψ — э. д. с. батарей термопар компенсационного сосуда КС,

Φ — э. д. с. батарей термопар рабочего сосуда PC) подается на дифференциатор D . С усилителя U сигнал дифференциатора подается на исполнительный механизм $ИМ$. Последний через редуктор перемещает ползунок потенциометра, питающего нагреватель, до тех пор, пока усиленный сигнал дифференциатора не уменьшится до значения, соответствующего напряжению трогания двигателя.

Это соответствует приближенному равенству производных температур обоих сосудов дифференциального калориметра или равенству мощности нагревателя постоянного тока в компенсационном сосуде мощности потерь испытуемого образца на высокой частоте в рабочем сосуде.

Работа элементов системы может быть выражена уравнениями динамики

$\Sigma = \varphi' = p(\Psi - \Phi)$ — выходной сигнал дифференциатора (закон регулирования);

$U = \alpha_1 \varphi$ — напряжение на выходе усилителя;

$p\mu = \alpha_2 U$ — приведенная скорость исполнительного двигателя;

$I = \alpha_3 \mu$ — перемещение реостата с механическим редуктором.

Линеаризованное уравнение дифференциального калориметра — объекта автоматического регулирования — для малых отклонений от положения равновесия можно записать в операторной форме

$$(\tau p + 1) p\theta = \alpha_4 I. \quad (7)$$

Исключая промежуточные переменные, найдем уравнение динамики системы в виде

$$[\tau p^2 + p + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4] p\Phi = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 p\Psi, \quad (8)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — коэффициенты усиления (пропорциональности) усилителя, исполнительного двигателя, реостата и объекта регулирования.

Относительно регулируемой величины — производной температуры $p\Psi$ — система описывается уравнением динамики второй степени. Система является структурно устойчивой — работоспособной. Расчет такой системы и выбор ее параметров не вызывает затруднений.

Принципиальная схема автоматического дифференциального калориметра с регулированием по температуре дана на рис. 3. Система с регулированием по температуре отличается от системы с регулированием по производной от температуры отсутствием дифференциатора.

Система работает следующим образом: на усилитель подается разностный сигнал обеих батарей термопар — рабочего и компенсационного сосудов. Исполнительный двигатель перемещает ползунок питающего нагреватель потенциометра до тех пор, пока разностный сигнал обеих батарей термопар не уменьшится до величины, соответствующей напряжению трогания исполнительного двигателя на выходе усилителя. Отсутствие разностного сигнала на выходе обеих батарей термопар в установившемся режиме соответствует одинаковой скорости нарастания температуры в обоих сосудах дифференциального калориметра и равенству мощности компенсационного нагревателя мощности потерь в испытуемом образце на высокой частоте.

Уравнения динамики, которыми описывается работа элементов системы:

$$\begin{aligned} \Sigma = \varphi = \Psi - \Phi & \text{ — закон регулирования;} \\ U = \alpha_1 \varphi & \text{ — напряжение на выходе усилителя;} \\ p\mu = \alpha_2 U & \text{ — приведенная скорость исполнительного двигателя;} \\ I = \alpha_3 \mu & \text{ — перемещение реостата;} \\ (\tau p + 1) p\Phi = \alpha_4 I & \text{ — сигнал, подаваемый на объект регулирования.} \end{aligned}$$

Исключая промежуточные переменные, получим линеаризованное уравнение динамики системы для малых отклонений в виде

$$(\tau p^3 + p^2 + \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4) \Phi = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \Psi. \quad (9)$$

Из уравнения динамики системы следует, что система неработоспособна (структурно неустойчива), поскольку в уравнении динамики системы отсутствует член с оператором p . Добиться структурной устойчивости (а следовательно, и работоспособности) системы можно различным путем, вводя в уравнение член с оператором p . Такими средствами могут быть, например, введение в систему дифференциатора температуры одного из сосудов калориметра, охват исполнительного двигателя жесткой обратной связью. Конструктивно проще осуществить жесткую обратную связь исполнительного двигателя.

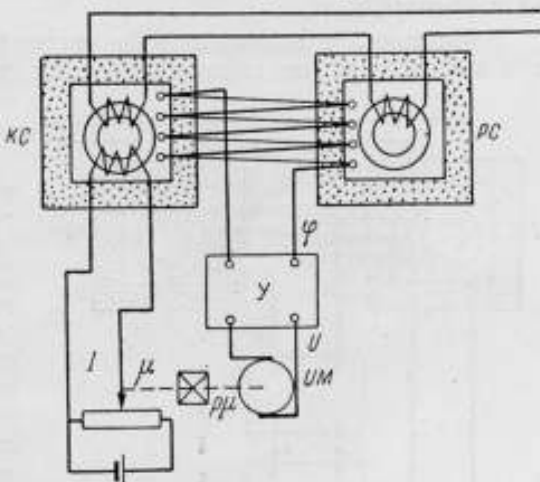


Рис. 3. Схема АДК непрерывного действия с регулированием по температуре.

Мы рассмотрели две схемы автоматического дифференциального калориметра — с регулированием по производной температуры и по температуре. Обе эти схемы регулирования являются непрерывными. Известно, что с повышением инерционности объекта регулирования (увеличение постоянной времени τ), т. е. при увеличении размеров испытуемого образца и увеличении размеров калориметра, работа непрерывных систем автоматического регулирования ухудшается. Для инерционных объектов более целесообразным является применение импульсных, прерывных систем автоматического регулирования, или регулирования пропусками.

Импульсное регулирование отличается от непрерывного тем, что мощность нагревателя в компенсационном сосуде дифференциального калориметра регулируется не изменением величины напряжения питания нагревателя, как это имеет место в системе непрерывного регулирования, а периодическим включением и отключением нагревателя. При этом нагреватель включается при помощи реле на неизменное напряжение, выбранное таким образом, чтобы при непрерывном включении нагревателя его мощность $P_{непр}$ была не меньше максимально возможной мощности потерь в испытуемом образце, т. е.

$$P_{непр} \geq P_{л\max}$$

В компенсационном нагревателе регулируется средняя во времени мощность. При непрерывно включенном реле имеем

$$P_{\text{непр}} = IU, \quad (10)$$

где I , U — ток и напряжение нагревателя.

При периодическом режиме включения с относительной длительностью включения (скважностью) γ , равной

$$\gamma = \frac{t_n}{t_n + t_o}, \quad (11)$$

где t_n — длительность включенного состояния нагревателя;
 t_o — длительность отключенного состояния нагревателя.

Средняя во времени мощность компенсационного нагревателя $P_{\text{ср}} = \gamma P_{\text{непр}}$. Таким образом, при неизменном значении $P_{\text{непр}}$ мерой потерь в испытуемом образце является скважность импульсов питания нагревателя γ .

Аналогично с непрерывными системами можно предложить два типа импульсных (прерывных) систем с регулированием по производной температуры и с регулированием по температуре.

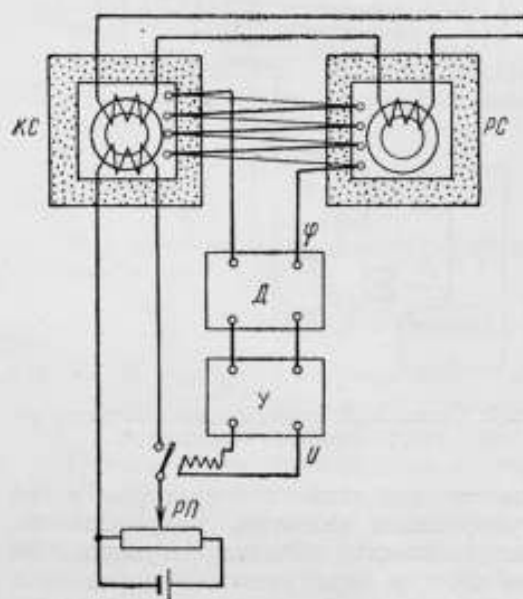


Рис. 4. Схема АДК непрерывного действия с регулированием по производной температуры.

температуры в рабочем сосуде калориметра. Графически работа системы иллюстрируется рис. 5.

При включенном реле температура в компенсационном сосуде нарастает по экспоненте со скоростью

$$\theta'_{\text{кв}}(t) = (\theta'_{\text{max}} - \theta'_p) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + \theta'_p, \quad (12)$$

где $\theta'_{\text{кв}}$ — скорость изменения (производная) температуры в компенсационном сосуде калориметра при включенном реле;

θ'_{max} — максимальная производная температуры в установившемся режиме в компенсационном сосуде при включенном реле;

θ_n' — производная температуры в компенсационном сосуде в момент включения нагревателя;

θ_p' — производная температуры в рабочем сосуде калориметра;

τ — постоянная времени компенсационного сосуда калориметра.

Реле остается включенным до тех пор (точка *a* на рис. 5), пока сигнал на выходе усилителя не уменьшится до напряжения отпускания реле

$$U_0 = k_n U_{ср}, \quad (13)$$

где k_n — коэффициент возврата реле,

т. е. до тех пор, пока разность производных температур рабочего и компенсационного сосудов не уменьшится до величины

$$\theta_p' - \theta_{кн}' = \Delta\theta_0' = \frac{U_0}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (14)$$

где α_1, α_2 — коэффициенты усиления дифференциатора и усилителя,

U_0 — напряжение отключения реле.

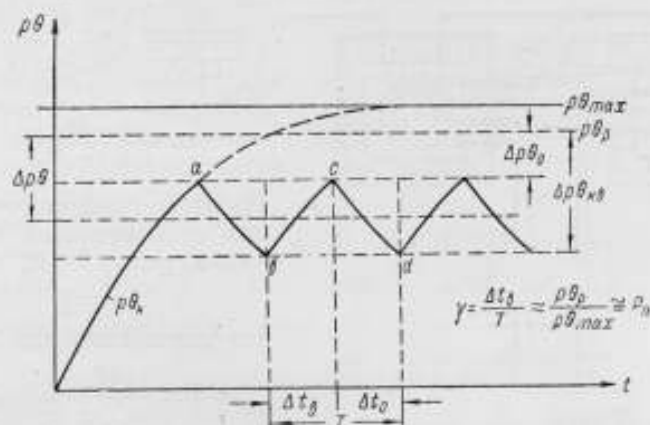


Рис. 5. Диаграмма работы АДК прерывного действия с регулированием по производной температуры.

После отключения реле в точке *a* производная температуры компенсационного сосуда при отключенном реле будет убывать по экспоненте

$$\theta'_{кн}(t) = \theta'_{кн} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $\theta'_{кн}(t)$ — производная температуры компенсационного сосуда при отключенном реле;

$\theta'_{кн} = \theta_p' - \Delta\theta_0'$ — производная температуры компенсационного сосуда в момент отключения реле.

Убывание производной $\theta'_{кн}(t)$ будет происходить до тех пор, пока разность $\theta_p' - \theta'_{кн}$ не увеличится до величины $\theta'_{кн}$, при которой напряжение на выходе усилителя станет равным напряжению срабатывания реле $U_{ср}$ (точка *b* на рис. 5). После включения реле производная температуры будет снова нарастать (участок *bc* на рис. 5) и т. д.

Из приведенных выше выражений для производной температуры компенсационного сосуда при включенном и отключенном нагревателе нетрудно найти выражение для скважности импульсов питающего тока

$$\gamma = \frac{\ln \left(1 - \beta \cdot \frac{\Delta \theta_n'}{\theta_p'} \cdot \frac{1}{1 - \beta + \delta} \right)}{\ln \left[\left(1 - \beta \cdot \frac{\Delta \theta_n'}{\theta_p'} \cdot \frac{1}{1 - \beta + \delta} \right) \left(1 - \beta \cdot \frac{\Delta \theta_n'}{\theta_p'} \cdot \frac{1}{\beta - k_n \delta} \right) \right]}, \quad (15)$$

где $\beta = \frac{\theta_p'}{\theta_{k \max}'}$ — относительное значение производной температуры рабочего сосуда калориметра;

$\delta = \frac{\Delta \theta_n'}{\theta_{k \max}'}$ — относительное значение производной температуры при включении реле.

Поскольку напряжение срабатывания (зона включения) реле δ мало, вышеприведенное выражение для скважности импульсов γ можно упростить, воспользовавшись его линейным разложением в степенной ряд. Для γ при этом нетрудно получить выражение

$$\gamma = \frac{\beta - \delta k_n}{1 + \delta - \delta k_n}. \quad (16)$$

Из этого следует, что при малой относительной зоне включения реле $\delta \rightarrow 0$, тогда

$$\gamma = \beta. \quad (16')$$

Из выражения для

$$\gamma = \beta = \frac{\theta_p'}{\theta_{k \max}'} = \frac{P_p}{P_{k \max}} \quad (17)$$

следует, что мощность в рабочем сосуде калориметра (мощность потерь в испытуемом образце) при неизменной максимальной мощности нагревателя компенсационного сосуда

$$P_p = \gamma P_{k \max}. \quad (18)$$

Погрешность метода измерения потерь определяется зоной нечувствительности реле и равна

$$\xi = - \frac{\delta (1 + k_n)}{2}. \quad (19)$$

Измерение скважности питающих импульсов может быть проведено различными импульсными схемами с практически неограниченной точностью.

Принципиальная схема импульсной системы с регулированием по температуре изображена на рис. 6. Система работает следующим обра-

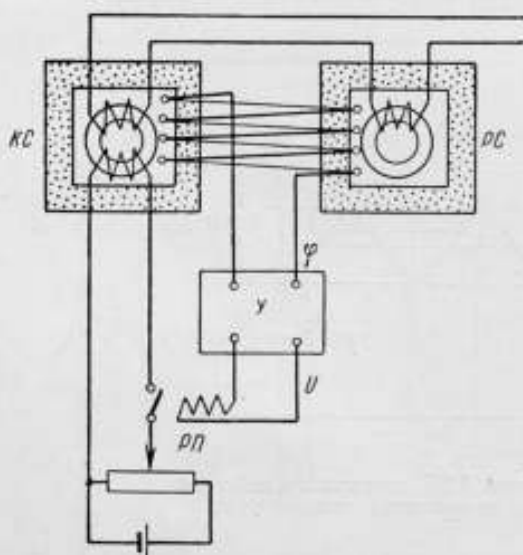


Рис. 6. Схема АДК прерывного действия с регулированием по температуре.

$P_{k \max}$ пропорциональна произведению скважности импульсов тока, питающего нагреватель компенсационного сосуда, на мощность нагревателя

зом — разностный сигнал Φ двух батарей термопар рабочего и компенсационного сосудов дифференциального калориметра подается на усилитель. Усиленный сигнал U подается на обмотку управления поляризованного реле $РП$, которая включает или отключает нагреватель компенсационного сосуда $КС$.

Кривые нарастания во времени температуры в обоих сосудах дифференциального калориметра изображены на рис. 7. В установившемся режиме при постоянной мощности потерь в испытуемом ферромагнитном образце температура рабочего сосуда нарастает с постоянной скоростью, пропорциональной мощности потерь, по прямой линии θ_p .

Реле включает нагреватель при превышении температуры рабочего сосуда температуры компенсационного сосуда на величину $\Delta\theta_n$, соответствующую выходному напряжению усилителя, равному напряжению срабатывания реле. При включенном нагревателе температура компенсационного сосуда будет нарастать с увеличивающейся скоростью и при уменьшении превышения температуры рабочего сосуда над температурой компенсационного до величины

$$\Delta\theta_0 = k_n \cdot \Delta\theta_n \quad (20)$$

реле выключит нагреватель (точка a).

После отключения нагревателя производная температуры компенсационного сосуда убывает по экспоненте, а температура нарастает по тому же закону (участок ab кривой θ_k).

Для температуры в компенсационном сосуде в отключенном состоянии (длительность интервала времени отключенного нагревателя Δt_0) и во включенном состоянии (длительность интервала времени включенного нагревателя Δt_n) можно получить два уравнения

$$\theta'_n \Delta t_0 - \theta'_{k \max} \cdot \tau \frac{\left(1 - e^{-\frac{\Delta t_0}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_n}{\tau}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)} = \Delta\theta_n (1 - k_n); \quad (21)$$

$$(\theta'_{k \max} - \theta'_p) \Delta t_n - \theta'_{k \max} \tau \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{\Delta t_0}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_n}{\tau}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)} = \Delta\theta_n (1 - k_n), \quad (22)$$

где $T = \Delta t_0 + \Delta t_n$ — период колебаний системы.

Вычитая первое уравнение из второго, получим

$$(\theta'_{k \max} - \theta'_p) \Delta t_n - \theta'_p \Delta t_0 = 0, \quad (23)$$

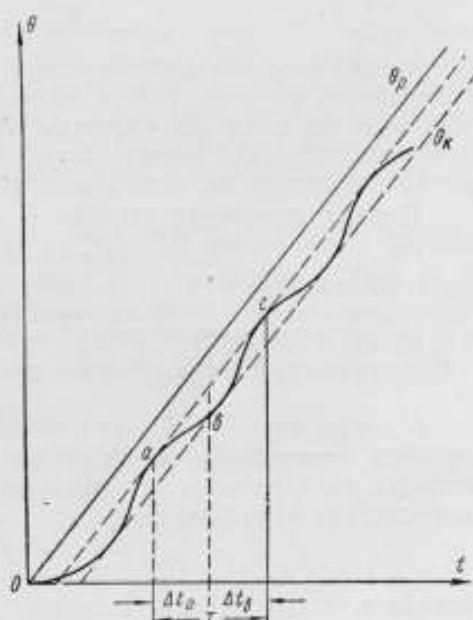


Рис. 7. Диаграмма работы АДК прерывного действия с регулированием по температуре.

откуда для скважности питающих импульсов тока получим

$$\gamma = \frac{\Delta t_n}{\Delta t_0 + \Delta t_n} = \frac{\theta_p'}{\theta'_{k \max}}. \quad (24)$$

Выражение для скважности питающих импульсов γ показывает, что в импульсной системе с регулированием по температуре методической погрешности нет, скважность импульсов питания точно равна отношению мощности потерь к максимальной мощности нагревателя, т. е.

$$P_p = \gamma P_{k \max}. \quad (25)$$

Отсутствие методической погрешности объясняется тем, что система регулирования по температуре является астатической относительно производной, не имеющей статизма по производной температуры. Отсутствие методической погрешности системы с регулированием по температуре является ее преимуществом.

Период колебаний системы $T = \Delta t_0 + \Delta t_n$ найдем, решая уравнение (21), обозначая $\theta_p' = \gamma \theta'_{k \max}$ и учитывая, что $\Delta t_n = \gamma T$, а $\Delta t_0 = (1 - \gamma) T$, уравнение (21) можно записать

$$\theta'_{k \max} \gamma (1 - \gamma) T - \theta'_{k \max} \tau \frac{\left(1 - e^{-\frac{\gamma T}{\tau}}\right) \left(1 - e^{-\frac{(1-\gamma)T}{\tau}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{T}{\tau}}\right)} = \Delta \theta_n (1 - k_n). \quad (26)$$

Это трансцендентное уравнение можно решить приближенно, используя разложение в степенной ряд и ограничиваясь членами первой степени, при этом получаем

$$\theta'_{k \max} \gamma (1 - \gamma) T = \Delta \theta_n (1 - k_n), \quad (27)$$

откуда период колебаний системы

$$T = \frac{\Delta \theta_n (1 - k_n)}{\theta'_{k \max} \gamma (1 - \gamma)}. \quad (28)$$

Обозначив чувствительность терморпар через α_τ , суммарный коэффициент усилителя — k_y , напряжение срабатывания реле U_{cp} , получим

$$T = \frac{U_{cp} (1 - k_n)}{\alpha_\tau k_y \theta'_{k \max} \gamma (1 - \gamma)}. \quad (29)$$

Это уравнение показывает, что T зависит от γ . Минимальный период колебаний T получается при $\gamma = 0,5$. Наиболее сложным элементом в этой системе является усилитель постоянного тока для малых сигналов.

Для примера определим коэффициент усиления усилителя k_y для получения $T = 1 \text{ сек}$ ($f = 1 \text{ гц}$) для таких параметров системы:

чувствительность батарей терморпары $\alpha_\tau = 0,0024 \frac{\text{г}}{\text{с}^\circ\text{C}}$;

напряжение срабатывания реле $U_c = 20 \cdot 10^{-3} \text{ в}$;

максимальная производная $\theta'_{k \max} = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{с}^\circ\text{C}}{\text{сек}}$;

коэффициент возврата реле $k_n = 0,3$.

Исходя из формулы

$$k_y = \frac{U_c (1 - k_n)}{T \cdot \alpha_\tau \theta'_{k \max} \gamma (1 - \gamma)},$$

при $\gamma = 0,5$, находим

$$k_y = \frac{20 \cdot 10^{-3} (1 - 0,3)}{1 \cdot 0,0024 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 (1 - 0,5)} = 2,33 \cdot 10^4.$$

Выводы

Анализ различных схем автоматического регулирования дифференциального калориметра для измерения потерь в магнитных материалах в широком диапазоне частот показывает:

1. Системы с регулированием по производной температуры являются статическими и обладают методической погрешностью измерений. Для непрерывной системы регулирования методическая погрешность зависит от выбора коэффициента усиления. В прерывно-импульсной системе методическая погрешность определяется максимально возможной частотой срабатывания поляризованного реле и коэффициентом усилителя.

2. Системы с регулированием по температуре являются астатическими и не обладают методической погрешностью.

3. С точки зрения конструктивного выполнения наиболее простыми являются прерывно-импульсные системы. Особенно проста импульсная система с регулированием по температуре, не требующая наличия очень трудно выполнимого дифференциатора малых медленно изменяющихся напряжений постоянного тока.

Измерение скважности импульсов питающего тока принципиальных затруднений не вызывает и может быть осуществлено с высокой точностью.

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ

ИЗМЕРИТЕЛЬ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 10 кГц—20 МГц С КООКСИАЛЬНЫМ ДЕРЖАТЕЛЕМ

В статье описан измеритель, основанный на мостовой схеме трансформаторного типа, предназначенный для испытаний высококачественных магнитных материалов в диапазоне частот от 10 кГц до 20 МГц.

Большинство методов определения магнитных характеристик материалов основано на использовании образцов материала тороидальной формы. Такие образцы позволяют подсчитать их внутреннее магнитное поле, которое дает возможность определить магнитные характеристики материала. Это просто сделать, когда на кольцо нанесена многovitковая равномерная намотка или когда через центр кольца проходит одновитковая обмотка.

Применение многovitковой обмотки ограничено относительно низкими частотами. С повышением их начинают все более и более сказываться влияния электрических полей между витками, потери в обмотке и диэлектрике магнитного материала. Все они вносят в результаты измерений большие и трудно исключаемые погрешности.

По этим причинам тороидальные образцы с многovitковыми обмотками на частотах выше нескольких мегагерц не нашли применения. В значительной степени свободны от этих влияний одновитковые обмотки. Они позволяют более полно учитывать влияние потерь в металле витка, понижают диэлектрические потери.

Эксперименты, проведенные автором, показали, что полного исключения диэлектрических потерь при одновитковых рамочных обмотках на частотах, больших 1 МГц, не наблюдается. Если при частотах 1—10 кГц их трудно обнаружить, то по мере повышения частоты они быстро возрастают и дают заметные погрешности, зависящие от размеров рамки и образца, от диэлектрической проницаемости и потерь испытуемого вещества.

Наилучшие результаты получаются с одновитковыми обмотками, выполненными в виде коаксиального держателя, в центре которого помещается испытуемый кольцеобразный образец. При таких испытаниях возможен наиболее полный учет всех погрешностей, обусловленных потерями в стенках держателя, в диэлектрике испытуемого образца, за счет отражения от его поверхности и т. д.

Если одновитковая рамочная обмотка применяется при частотах 5–30 Мгц, то коаксиальные держатели в виде резонаторов или линий с успехом могут быть применены только от десятка до несколько тысяч мегагерц.

Поэтому целесообразно распространить этот метод на испытания при относительно низких радиочастотах, что приведет к повышению точности и упрощению процесса измерения, так как отпадет необходимость в нанесении на испытуемый образец вспомогательной обмотки. Последнее имеет существенное значение, потому что позволит осуществить автоматический контроль всей выпускаемой продукции.

Основным препятствием для применения коаксиальных держателей при пониженных частотах является трудность измерения очень малых индуктивностей и активных сопротивлений на этих частотах.

В настоящее время не выпускаются измерительные приборы, позволяющие точно измерять приращения индуктивности в несколько сантиметров и сопротивлений в 0,01–0,001 ом при частотах, больших нескольких килогерц. В Новосибирском государственном институте мер и измерительных приборов (НГИМИП) была проведена работа по созданию такого прибора. Исследование двух созданных макетов показало, что они пригодны для магнитных измерений и могут послужить основой для разработки промышленного образца.

В основу прибора положена схема моста с последовательным питанием, представленная на рис. 1. Эта схема относится к семейству трансформаторных мостов, рассмотренных и развитых в работах Травбриджа [1], А. Хунда [2, 3], К. Б. Карандеева [4, 5] и других авторов [6].

Рассматриваемая схема несколько похожа на схему двойного моста Томсона, применяемую при измерении малых сопротивлений при постоянном токе. В этой схеме образцовые меры — конденсатор C_0 , сопротивления R_0 и R_3 — и измеряемое полное сопротивление Z_x могут иметь, наряду с токовыми зажимами — потенциальные, напряжения с которых подаются на обмотки трансформаторного узла, имеющего три идентичные первичные обмотки и одну вторичную.

В момент настройки схемы в магнитопроводе трансформатора магнитное поле равно нулю. Это выполняется при условии, если

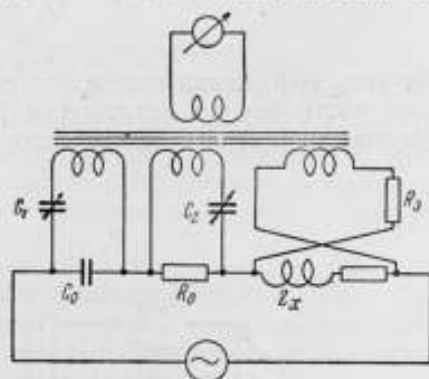


Рис. 1. Схема трансформаторного моста с последовательным питанием.

$$L_x = \frac{R_0 R_3 C_2 \left(1 + \frac{C_1}{C_0}\right)^2}{1 + \left(\omega^2 \frac{C_1 C_2}{C_0} R_0\right)^2}; \quad (1)$$

$$R_x = \frac{\frac{C_1}{C_0} R_3 \left[1 - \omega^2 C_1^2 R_0^2 \left(1 + 2 \frac{C_1}{C_0}\right)\right]}{1 + \left(\omega \frac{C_1 C_2}{C_0} R_0\right)^2}. \quad (2)$$

Обычно при относительно низких частотах, не допуская погрешности, большей 0,1%, выражения (1) и (2) можно упростить до вида:

$$L_x = R_0 R_3 C_2; \quad (1')$$

$$R_x = R_3 \frac{C_1}{C_0}, \quad (2')$$

откуда

$$Q_x = \omega R_0 \frac{C_2 C_0}{C_1}. \quad (3)$$

Из этих выражений видно, что схема позволяет осуществлять раздельную настройку по активной и реактивной составляющим только при помощи переменных конденсаторов C_1 и C_2 . Это большое ее преимуще-

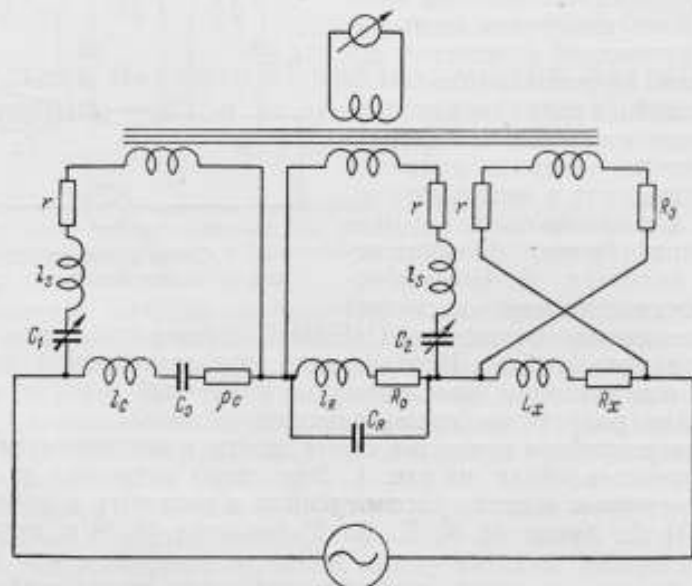


Рис. 2. Схема трансформаторного моста с учетом остаточных параметров.

ство, так как на сегодня нет еще частотонезависимых переменных высокочастотных сопротивлений с ничтожными остаточными реактивностями.

На рис. 2 представлена схема трансформаторного моста с учетом остаточных параметров. К ним необходимо отнести: r , l_S — сопротивление обмоток трансформатора и их индуктивность рассеяния; l_C и l_R — индуктивности образцовых конденсатора C_0 и сопротивления R_0 ; ρ — потери в конденсаторе C_0 ; C_R — емкость, шунтирующая сопротивление R_0 .

С учетом этих параметров уравнения равновесия будут иметь вид

$$L_x = \frac{R_0 \bar{C}_2 (R_3 + r) \left(1 + \frac{\bar{C}_1}{C_0}\right)^2 + l_S \frac{\bar{C}_1}{C_0} [1 - \omega^2 \bar{C}_2^2 R_0^2] - \bar{C}_1 \rho_C R_3}{1 + \left(\omega \frac{C_1 C_2}{C_0} R_0\right)^2 + \omega^2 C_1 C_2^2 R_0 + \omega^2 C_1 C_2 \rho R_0 - \omega^2 C_1 C_2 r^2}, \quad (4)$$

$$R_x = \frac{\bar{C}_1 (R_3 + r) \left[1 - \omega^2 R_0^2 \bar{C}_2^2 \left(1 + 2 \frac{\bar{C}_1}{C_0} \right) - \right.}{1 + \left(\omega \frac{C_1 C_2}{C_0} R_0 \right)^2 + \omega^2 C_1 C_2 l_R +} \left. \frac{- 2 \omega^2 C_1 C_2 R_0 p - \omega^2 C_2 l_S - \omega^2 \frac{C_1 C_2}{C_0} l_c R_3}{+ \omega^2 C_1 C_2 R_0 - \omega^2 C_1 C_2 r^2} \right], \quad (5)$$

где

$$\bar{C}_1 = \frac{C_1}{1 - \omega^2 C_1 l_S}; \quad \bar{C}_2 = \frac{C_2}{1 - \omega^2 C_2 l_S}; \quad \bar{C}_0 = \frac{C_0}{1 - \omega^2 C_0 l_C}.$$

Рассматриваемую измерительную схему наиболее целесообразно приспособить для измерения свойств магнитных материалов со средними и малыми потерями на частотах до 20 Мгц, так как на более высоких частотах имеются отработанная методика измерений и измерительная аппаратура.

При таких ограничениях численные значения отдельных элементов схемы будут заключены в следующих пределах: $C_1 = 0,01 \div 10$ пф; $C_2 = 10 \div 500$ пф; $R_0 = 1 \div 10$ ом; $R_3 = 30 \div 100$ ом, что позволит при вычислении результатов измерений, если нет необходимости в получении предельной точности, использовать укороченные формулы

$$L_x = R_0 \bar{C}_2 (R_3 + r) \left(1 + \frac{\bar{C}_1}{C_0} \right)^2, \quad (6)$$

$$R_x = \frac{\bar{C}_1}{C_0} (R_3 + r) \left[1 - \omega^2 R_0^2 C_2^2 \left(1 + 2 \frac{C_1}{C_0} \right) \right]. \quad (7)$$

Измерительный прибор был выполнен в виде двух макетов. Первый макет имел частотный диапазон 10 кгц \div 1,5 Мгц и давал возможность измерять индуктивность от 1 до $750 \cdot 10^{-9}$ гн и сопротивления от $0,0001$ до 0,3 ом, с погрешностью порядка 1%. Более подробные сведения о его конструкции приведены в опубликованной ранее работе автора [7].

При испытании макета было выяснено, что он позволяет измерять параметры ферритов; процесс измерения прост, повторяемость хорошая, но из-за изменения температуры коаксиального держателя оказалось невозможным проводить разделение по потерям сердечников из карбонового железа типов «экстра» и «высший», имеющих близкие по величине, но очень малые потери. Анализ показал, что для таких измерений необходим специально сконструированный прибор с узкими диапазонами измерений, имеющий более стабильную начальную настройку.

Была сделана попытка решить эту задачу при конструировании второго макета измерителя узкого применения с частотным диапазоном от 0,5 до 20 Мгц. Он разрабатывался только для измерения параметров образцов магнитных материалов, имеющих проницаемость $\mu = 8-40$ и $\text{tg } \delta_m = (0,5 \div 30) \cdot 10^{-4}$, выполненных из колец с наружным диаметром не более 40 мм и внутренним не менее 11 мм. Основные элементы схемы измерителя (рис. 3) собраны в коаксиальном держателе, который возбуждается питающим трансформатором T_1 . Геометрические размеры держателя и обмотки трансформатора рассчитаны таким образом, чтобы получить первый последовательный резонанс в цепи, состоящей из индуктивностей держателя и индуктивности рассеяния первичной обмотки T_1 и емкости C_0 , на высшей частоте диапазона и второй, параллельный

резонанс между индуктивностью первичной обмотки T_1 и C_0 на низкой частоте частотного диапазона.

Рабочая часть держателя, в которую помещают испытуемый образец, выполнена из манганина, обеспечивающего температурную стабильность схемы.

С целью получения заданного диапазона измеряемых величин и наибольшей чувствительности схемы геометрические размеры рабочей части держателя рассчитаны по специально разработанной формуле

$$l_p = \frac{\mu - 1}{K - 1} l_n \frac{\lg \frac{D_3}{D_2}}{\lg \frac{D_3}{D_1}}, \quad (8)$$

где $K = \frac{C_{2 \max}}{C_{2 \min}}$,

μ — наибольшая проницаемость испытуемого материала.

Остальные обозначения приведены на рис. 3.

Трансформаторный узел моста T_2 состоит из двух трансформаторов, связанных между собой витком связи. Обмотки трансформаторов

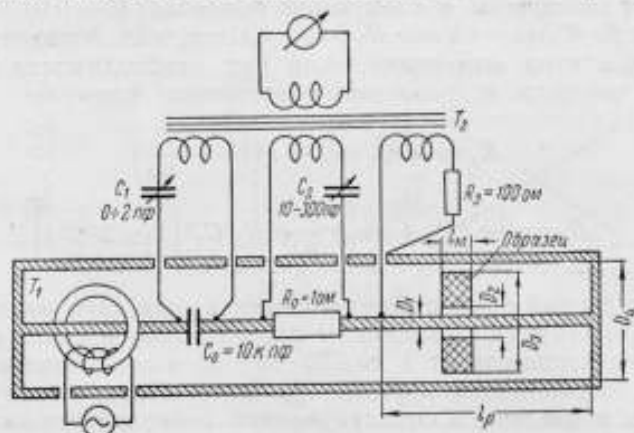


Рис. 3. Схема включения элементов моста в коаксиальном держателе.

имеют по семь витков и намотаны медными лентами; сопротивление их при постоянном токе порядка 0,02 ом. Индуктивность рассеяния сведена к минимуму методами, достаточно подробно изложенными в работах [8, 9, 10]. Также были приняты меры к понижению межвитковых емкостей.

Конденсаторы C_1 , C_2 и C_0 , а также сопротивления R_0 и R_3 по конструкции аналогичны поставленным в первом макете.

Все элементы, входящие в мост, перед сборкой градуировались на частоте 1000 гц. С целью исключения частотной погрешности за счет остаточных параметров схемы была проведена дополнительная градуировка на всех рабочих частотах прибора; при этом в качестве образцовых мер приращения индуктивности применялся набор из нескольких короткозамкнутых отрезков коаксиальной линии разной длины с диаметрами, равными диаметрам рабочей части держателя. При градуировке они приключаются взамен закорачивающего диска.

Расчет индуктивности таких мер можно сделать по известным формулам, приведенным в работе П. Л. Калантарова и Л. А. Цейтлина [11]. Градуировка шкалы отсчета активной составляющей измеряемого со-

противления осуществлялась при помощи специальной закорачивающей шайбы со вставками из коротких тонких проводов разной длины. Как известно, на частотах до 20 Мгц тонкие провода имеют малую частотную зависимость сопротивления, к примеру, провод из манганина диаметром в 0,15 мм на частоте в 15 Мгц имеет повышение сопротивления за счет поверхностного эффекта меньше 1%, по сравнению со значением его сопротивления на постоянном токе, равном 0,024 ом на 1 мм длины.

При градуировке действительное сопротивление закорачивающей шайбы со вставкой определяется на постоянном токе. Сохранение постоянства условий измерения сопротивления вставок позволяет достаточно точно определить приращение их сопротивления, исключая при этом переходные сопротивления, остающиеся постоянными вне зависимости от величины сопротивления вставок.

Предварительные исследования макета показали, что он имеет стабильную начальную настройку, обеспечивает измерения малых приращений индуктивности и сопротивления при введении в рабочую часть держателя испытуемых цилиндрических колец из карбонильного железа или высокочастотного феррита, имеющих вышеприведенные параметры. Переход от измеренных приращений к характеристикам вещества осуществляется по формулам, приведенным в ранее опубликованной литературе [12] и [13].

Определение точности измерений при помощи второго макета предполагается сделать несколько позднее.

Проделанная работа позволяет утверждать, что избранная схема пригодна для определения характеристик магнитных материалов при помощи коаксиального держателя без нанесения на испытуемые цилиндрические кольца вспомогательных обмоток в диапазоне частот до 20 Мгц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Throwbridge A., On the differential transformer, *Physical Review*, v. XX, feb. N 2, 1905.
2. Hund A., *Jahrb. der Elektrotechnik*, 1913, S. 199.
3. Hund A., *Elektrical World*, v. 65, 1915, pp. 294—295; *Jahrb. der Tel und Teleph.*, Bd. 13, 1918, SS. 462—450.
4. Карандеев К. Б., Научные записки Львовского политехнического института, вып. V, серия электротехническая, № 2, Львов, 1949.
5. Карандеев К. Б., Методы электрических измерений, Госиздат техлитературы УССР, 1953.
6. Fromy E., *Mesures en Radiotechnique*, Paris, DUNOD, 1958.
7. Грохольский А. Л., Труды конференции по автоматическому контролю и методы электрических измерений. Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения АН СССР, 1960.
8. O'Meara T., *Proc. of the National Electronics Conference*, v. X, 1957.
9. Maurice D., Minns R., *Wireless Engineer*, June, 1947.
10. O'Meara T., Sydney R., *PIRE*, № 5, 1958.
11. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А., Расчет индуктивностей, Госэнергоиздат, 1955.
12. Bady I., Franklin R., *IRE National Conv. Record.*, 1957, p. 5.
13. Рабкин Л. И., Высокочастотные ферромагнетики, Физматгиз, 1960.

А. Л. ГРОХОЛЬСКИЙ, А. Ф. КУГАЕВСКИЙ

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 10 кГц—750 МГц

В статье рассматривается ряд образцовых установок, разрабатываемых в Новосибирском государственном институте мер и измерительных приборов для определения параметров нормальных образцов высокочастотных ферромагнитных материалов кольцеобразной формы.

В течение нескольких последних лет в НГИМИП ведется разработка методов и аппаратуры для определения характеристик магнитных материалов при частотах от 10 кГц до 750 МГц.

Эти работы проводятся по двум направлениям: а) разрабатываются образцовая аппаратура наивысшей точности и приспособления для определения характеристик нормальных образцов магнитных материа-

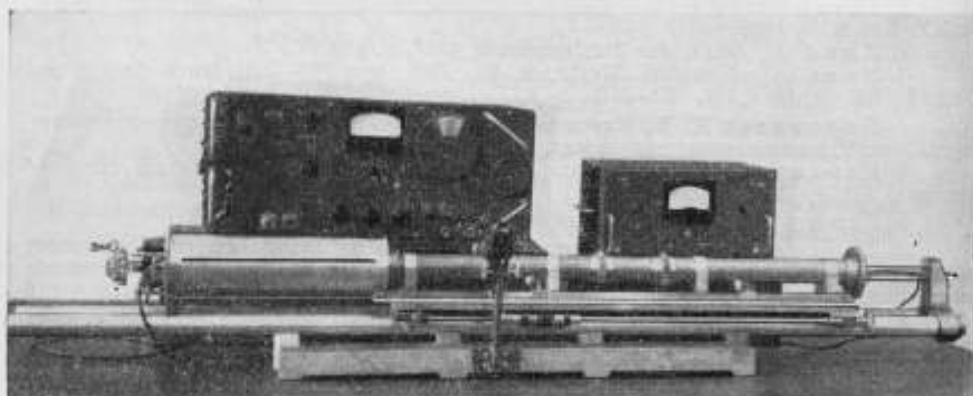


Рис. 1. Установка с коаксиальным резонатором.

лов; б) создаются рабочая измерительная аппаратура ограниченной точности и приспособления для контроля выпускаемой продукции.

Программой работ предусмотрено создание ряда установок, позволяющих определять параметры нормальных образцов высокочастотных ферромагнитных материалов кольцеобразной формы путем введения их в коаксиальные держатели.

Предполагается применить этот принцип измерений от частот в 750 Мгц до звуковых частот.

Для испытаний при частотах 200 ÷ 750 Мгц создана установка с коаксиальным резонатором (рис. 1). Испытуемый образец диаметром в 50 мм помещается в зависимости от характера испытаний в пучность тока или напряжения. Возмущения, вызванные введением в резонатор образца, определяются по смещению закорачивающих поршней, которые отсчитываются микро-скопами с погрешностью меньшей микрона и при помощи точных аттенуаторов.

Установка находится в стадии детального исследования. К настоящему моменту уже достигнуты следующие точности: 5—10% при измерениях относительной проницаемости 1 ÷ 30 и 10—25% при определении тангенса угла потерь 0,001 ÷ 2.

Необходимо отметить, что установка позволяет проводить испытания как магнитных, так и диэлектрических свойств веществ при нормальных и повышенных температурах.

На частотах ниже 200 Мгц для испытаний применяются коаксиальные линии совместно с точным измерителем полной проводимости типа ИПП-2 (рис. 2).

Этот прибор разработан в НГИМИП, и в текущем году выпускается малой серией. Он измеряет проводимости реактивные ± 100 пф и активные 0,1 ÷ 0,0002 сименса с погрешностями порядка 0,05—0,5% в зависимости от частоты.

Чувствительность ИПП-2 позволяет фиксировать смещение закорачивающего поршня коаксиального устройства в 0,5—1 мк. Хотя ИПП-2 может работать на частотах до 1 Мгц, магнитные измерения с его помощью проводятся на частотах не ниже 10 Мгц из-за значительного возрастания длины коаксиальной линии на более низких частотах, приводящего к потере чувствительности и точности.

Частотный диапазон от 20 Мгц до 10 кгц предполагается перекрыть двумя измерителями. Лаборатория НГИМИП уже располагает двумя макетами подобных измерителей. Это трансформаторные мосты с коаксиальными держателями, один из которых представлен на рис. 3. Они измеряют изменения индуктивности 1 ÷ 750 · 10⁻⁹ гн и активного сопротивления 0,0001 ÷ 0,3 ом с погрешностями меньшими 1—3%. Предполагается, что эту погрешность можно будет понизить.

Все упомянутые установки предназначаются для аттестации нормальных образцов, при помощи которых полученные результаты предполагается передавать рабочим приборам.

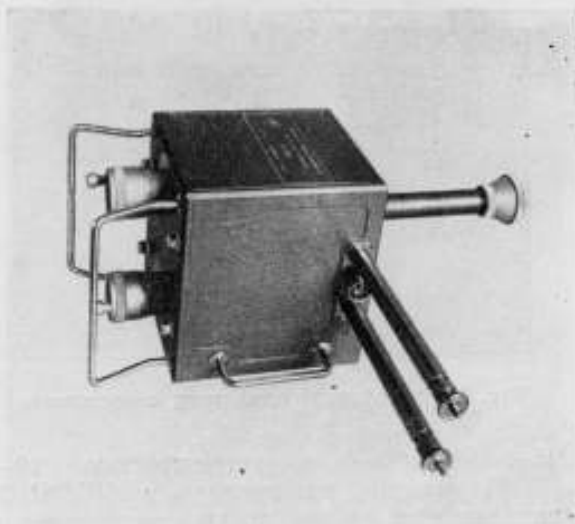


Рис. 2. Измеритель полной проводимости типа ИПП-2.

С нашей точки зрения, для развития магнитных измерений на радиочастотах наиболее перспективными являются пермеаметры в сочетании с измерителями добротности.

До сих пор внедрение высокочастотных пермеаметров тормозилось отсутствием измерителей добротности высокого качества. Эти затруднения уходят в прошлое и в ближайшее время в лаборатории начнут поступать:

а) низкочастотные измерители добротности типа ИДН-1 с резонансной емкостью контура до 110 000 пф, измеряющие добротность в частотном диапазоне 1 ÷ 100 кГц с погрешностью порядка 6%; б) всеволновые измерители добротности с частотным диапазоном 50 кГц — 35 МГц, измеряющие добротности с погрешностью 4—5%; в) куметры с частотным диапазоном



Рис. 3. Трансформаторный мост с коаксиальным держателем.

15 ÷ 250 МГц и погрешностью 10—15%.

Испытания, проведенные в НГИМИП показали, что все куметры находятся на уровне лучших международных образцов. Их реальная



Рис. 4. Набор высокочастотных пермеаметров.

точность выше рекламных точностей многих иностранных фирм. Следует отметить, что новые куметры позволяют измерять низкие добротности

сти, начиная от 3 единиц, что очень важно при магнитных испытаниях.

В 1961 г. опытное производство НГИМИП выпускает опытную серию наборов высокочастотных пермеаметров, состоящих из 6 приборов (рис. 4), позволяющих в частотном диапазоне 0,5–40 Мгц измерять относительную магнитную проницаемость до 300 с погрешностью порядка 5% и тангенсом угла потерь 0,8–0,01 с погрешностями, меньшими 10%.

Приведенные диапазоны и погрешности во многом зависят от размеров образцов и получены применительно к куметрам старых типов — КВ-1 и УК-1. При замене их новыми куметрами повысится точность и расширится диапазон.

Предполагается расширить частотный диапазон как в сторону низких частот, так и высоких. Эксперименты показали, что возможно достигнуть частот в 200–250 Мгц.

В институте начаты работы по измерению характеристик при различной напряженности магнитного поля. Созданы макеты пермеаметров с регулируемой температурой испытания.

При выполнении всех этих работ большую трудность вызывает отсутствие стандартизации нормальных образцов высокочастотных магнитных материалов. Это очень важный вопрос, определяющий во многом размеры и характеристики измерительной аппаратуры. Его необходимо решить в ближайшее время. Без этого достигнутые точности образцовых установок нельзя будет передать рабочим приборам и невозможно будет добиться единства этого вида измерений в СССР.

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ОДНОВИТКОВОЙ ИНДУКТИВНОСТИ МЕТОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ

В статье рассматривается возможность применения устройства с коаксиальной линией для измерения магнитной проницаемости и одновитковой индуктивности методом замещения.

Измерение магнитной проницаемости у кольцевых образцов ферритов на высоких частотах с малой погрешностью в настоящее время приобрело первостепенное значение.

Отсутствие аппаратуры не позволяет производить такие важные исследования, как например, влияние на стабильность магнитной проницаемости температурных циклов, сильных переменных магнитных полей, вибрации, тряски, γ -излучений и других факторов.

В данной работе рассматривается измерение магнитной проницаемости и одновитковой индуктивности методом замещения с помощью регулируемой «объемной» индуктивности. На рис. 1, а изображена блок-схема установки. Торонд колебательного контура генератора с самовозбуждением помещен в объеме коаксиальной линии. Крышка коаксиальной линии закрывается и зако-

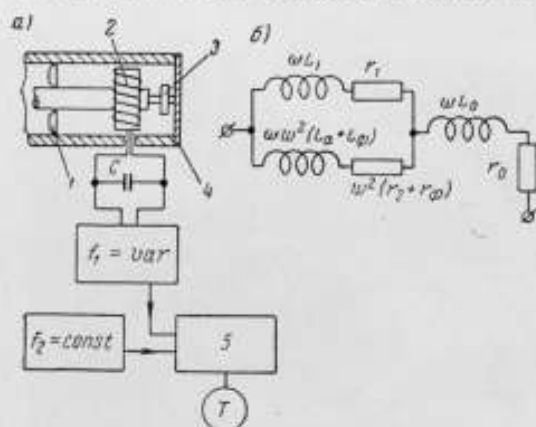


Рис. 1. Блок-схема установки и эквивалентная принципиальная схема коаксиальной линии: 1 — плунжер; 2 — контурный торонд; 3 — феррит; 4 — крышка; 5 — смеситель и детектор.

рывает средний стержень с трубой. Длина коаксиальной линии должна быть значительно меньше четверти длины волны. В этом случае объем коаксиальной линии может рассматриваться как индуктивность.

Как видно из эквивалентной принципиальной схемы, приведенной на рис. 1, б, параметры коаксиальной линии существенно влияют на частоту f_1 генератора при условии, что геометрическая индуктивность ли-

нии L_0 , пересчитанная на первичную цепь, значительно меньше индуктивности контурного тороида L_1 , т. е. $\omega^2 L_0 \gg L_1$.

В этом случае результирующая индуктивность контура будет сильно зависеть от положения плунжера коаксиальной линии

$$L_n \approx \omega^2 (L_a + L_\phi), \quad (1)$$

а следовательно, и частота f_1 будет зависеть от положения плунжера, т. е.

$$f_1 = F(L_\phi + L_a).$$

Процесс измерения магнитной проницаемости и одновитковой индуктивности сводится к следующему:

1. Линия закрыта крышкой, но без испытуемого образца; плунжер поставлен в крайнее левое положение (объемная индуктивность L_a имеет максимальное значение); частота f_1 генератора регулируется так, чтобы были достигнуты нулевые биения с частотой f_2 .

2. Крышка открывается, и вкладывается испытуемый образец феррита; крышка плотно закрывается; индуктивность коаксиальной линии увеличилась, частота f_1 уменьшилась и в телефоне T биения не слышны. Путем перемещения плунжера направо, т. е. уменьшением индуктивности L_a , вновь добиваются нулевых биений. По величине перемещения плунжера судят о магнитной проницаемости или одновитковой индуктивности испытуемого феррита.

Для пояснения обратимся к рис. 2. При внесении испытуемого феррита в коаксиальную линию изменится индуктивность объема и это изменение будет равно разности между величиной одновитковой индуктивности испытуемого феррита и его геометрической индуктивностью

$$\Delta L = L_\phi - L_{a\phi} = L_{a\phi} (\mu_r - 1).$$

Очевидно, что для достижения нулевых биений необходимо переместить плунжер направо, т. е. уменьшить геометрическую индуктивность коаксиальной линии на эту величину. Из этих условий определяют величину магнитной проницаемости

$$\mu_r = \frac{\Delta L}{L_{a\phi}} + 1 = \frac{0,4605 \cdot 10^{-6} \Delta l \lg \frac{D}{d}}{0,4605 \cdot 10^{-6} h_\phi \lg \frac{D_\phi}{d_\phi}} + 1 = \frac{\Delta l \cdot \lg \frac{D}{d}}{h_\phi \cdot \lg \frac{D_\phi}{d_\phi}} + 1. \quad (2)$$

Относительная погрешность определения магнитной проницаемости составляет в основном сумму относительной погрешности отсчета перемещения плунжера Δl и относительной погрешности измерения толщины испытуемого феррита h_ϕ . Таким образом, для получения малых погрешностей необходимо брать испытуемые образцы с достаточно большой величиной h_ϕ , что позволит иметь малую относительную погрешность измерения h_ϕ .

Измерение одновитковой индуктивности испытуемого феррита h_ϕ может быть получено со значительно меньшей погрешностью и

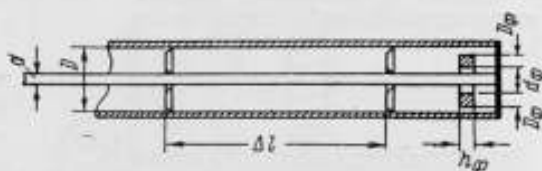


Рис. 2. Эскиз коаксиальной линии.

в случае малых величин h_{ϕ} . Одновитковая индуктивность феррита определяется как

$$L_{\phi} = 0,4605 \cdot 10^{-6} \left(\Delta l \cdot \lg \frac{D}{d} + h_{\phi} \lg \frac{D_{\phi}}{d_{\phi}} \right), \quad (3)$$

так как член $\Delta l \cdot \lg \frac{D}{d}$ во много раз больше члена $h_{\phi} \cdot \lg \frac{D_{\phi}}{d_{\phi}}$, то относительная погрешность одновитковой индуктивности δL_{ϕ} в основном определяется погрешностью отсчета перемещения плунжера Δl .

Формулы (2) и (3) показывают, что получаемые результаты не зависят от частоты и определяются только геометрическими размерами «объемной» индуктивности — коаксиальной линии и размерами испытуемых образцов.

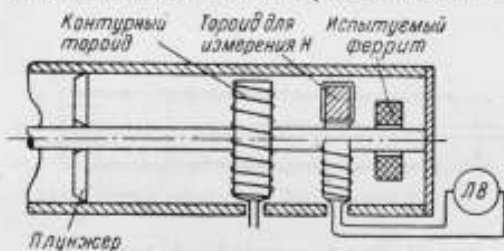


Рис. 3. Коаксиальная линия с катушкой для измерения напряженности магнитного поля.

Определение величины напряженности поля H в испытуемых образцах ферритов может быть выполнено с помощью тороида с немагнитным сердечником. На рис. 3 изображена схема измерения напряженности поля. Э. д. с., индуцируемая в тороиде для определения напряженности

поля H , измеряется ламповым милливольтметром.

$$e = -\omega \frac{d\psi}{dt} = -\omega \cdot L_a \frac{di}{dt} = -\frac{\mu_0 h}{2\pi} \omega \cdot \frac{di}{dt} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (4)$$

где h — толщина тороида;

R_1 и R_2 — его радиусы;

ω — число витков тороида;

i — мгновенное значение тока в коаксиальной линии.

Из уравнения (4) можно определить амплитудное значение э. д. с.

$$E_{\max} = \frac{\mu_0 \cdot h}{2\pi} \omega \cdot \omega \cdot I_{\max} \ln \frac{R_2}{R_1}, \quad (5)$$

откуда

$$I_{\max} = \frac{2\pi \cdot E_{\max}}{\mu_0 \cdot h \cdot \omega \cdot \omega \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (6)$$

и напряженность поля H в точках испытуемого феррита на линии с радиусом r определяется так:

$$H_{\max} = \frac{I_{\max}}{2\pi \cdot r} = \frac{E_{\max}}{\mu_0 h \cdot \omega \cdot \omega \cdot r \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}. \quad (7)$$

График (рис. 4) изображает зависимость изменения геометрической индуктивности макета коаксиальной линии от перемещения плунжера. На этом макете было измерено и разбито на группы несколько сот образцов ферритов на частоте 5 Мгц. Несколько групп было намотано с числом витков

$$\omega = \sqrt{\frac{L_{\text{ном}}}{L_{\phi}}}. \quad (8)$$

Полученные индуктивности $L_{\text{ном}}$ у всех торондов укладывались в допуск $\pm 5\%$.

При измерении одновитковой индуктивности феррита относительная погрешность определения Δl увеличивается в области малых отсчетов Δl (так как абсолютная погрешность остается неизменной).

В целях сохранения постоянства относительной погрешности измерения одновитковой индуктивности ферритов целесообразно иметь неравномерное распределение геометрической индуктивности по длине коаксиальной линии. На рис. 5 изображено распределение индуктивностей L_n ; L_{n+1} и т. д. по логарифмическому закону. Отрезки выбраны так, чтобы шаг имел определенное значение в процентах K от значения данной индуктивности, т. е. чтобы имело место равенство

$$L_n \left(1 + \frac{K}{100}\right) = L_{n+1} \left(1 - \frac{K}{100}\right) \quad (9)$$

или

$$L_{n+1} \left(1 + \frac{K}{100}\right) = L_{n+2} \left(1 - \frac{K}{100}\right), \quad (10)$$

тогда

$$L_{n+m} = L_n \left(\frac{1 + \frac{K}{100}}{1 - \frac{K}{100}} \right)^m = L_n q^m. \quad (11)$$

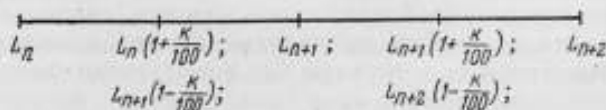


Рис. 5. Распределение индуктивностей вдоль коаксиальной линии для случая постоянства относительной погрешности измерения.

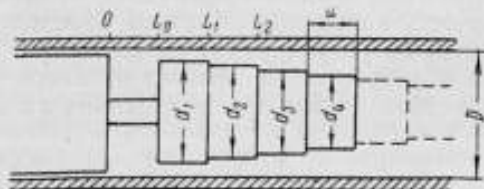


Рис. 6. Эскиз коаксиальной линии для случая постоянства относительной погрешности измерения.

Если задаться отношением максимального значения индуктивности L_{n+m} к минимальному значению L_n , равным 10, и взять число отрезков $m=50$, то $q=1,047$ и $K=2,296\%$.

На рис. 6 изображена коаксиальная линия, в которой средний стержень имеет переменный диаметр, определяемый уравнением

$$d_N = \frac{D}{10 \frac{L_0 q^N - L_{N-1}}{0,4605 \cdot a \cdot 10^{-6}}}, \quad (12)$$

где a в метрах и L в генри.

$$L = L_0 + \Delta L_1 = L_0 + 0,4605 \cdot a \cdot 10^{-6} \cdot \lg \frac{D}{d} = L_0 \cdot 1,047^1;$$

$$L_2 = L_1 + \Delta L_2 = L_1 + 0,4605 \cdot a \cdot 10^{-6} \cdot \lg \frac{D}{d_2} = L_0 \cdot 1,047^2;$$

$$L_N = L_{N-1} + \Delta L_N = L_{N-1} + 0,4605 \cdot a \cdot 10^{-6} \lg \frac{D}{d_N} = L_0 \cdot 1,047^N;$$

$$\lg \frac{D}{d_N} = \frac{L_0 \cdot 1,047^N - L_{N-1}}{0,4605 \cdot a \cdot 10^{-6}}.$$

В случаях, когда необходимо произвести исследование образцов с постоянным подмагничиванием, может быть применена схема, изображенная на рис. 7.

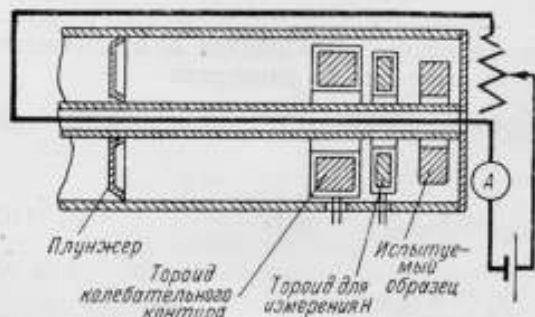


Рис. 7. Эскиз коаксиальной линии со схемой подмагничивания постоянным током.

Ввиду малой глубины проникновения высокочастотных токов в стенки коаксиальной линии в цепи постоянного тока не будет индуцироваться переменная электродвижущая сила. При изменении подмагничивающего тока изменяется индуктивность тороида колебательного контура (если он изготовлен из ферромагнитного материала), и поэтому необходимо для каждого значения постоянного тока производить настройку на нулевые биения коаксиальной линии в крайнем положении ее плунжера без испытуемого феррита.

Заключение

Ввиду того, что относительная магнитная проницаемость и одновитковая индуктивность кольцевых образцов определяются только геометрическими размерами регулируемой «объемной» индуктивности и размерами образца и результат не зависит от частоты, описанный метод может являться образцовым при измерениях на высоких частотах.

Э. М. МУШКАРДЕН, Г. А. ШЕВЦОВ

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРИТОВ В ДИАПАЗОНЕ РАДИОЧАСТОТ

В статье даны описания специального куметра ИПФМ и комплекта высокочастотных пермеаметров, предназначенных для измерения комплексной магнитной проницаемости.

Для определения относительной магнитной проницаемости μ и тангенса угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ ферритов в слабых магнитных полях высокой частоты в настоящее время используются различные методы, основанные на измерении комплексного сопротивления проводников определенной формы, в магнитное поле которых помещается испытуемый ферромагнитный образец. В технической литературе описаны применяющиеся для этой цели различные разборные коаксиальные катушки, коаксиальные линии, рамки и т. д. [1].

Накопленный опыт показывает, что для измерения μ и $\operatorname{tg} \delta$ ферритов в диапазоне частот от 50 кГц до 200 МГц можно успешно применять куметр соответствующего класса точности и комплект специальных пермеаметров.

В рассматриваемый прибор входит высокочастотный куметр ИПФМ, разработанный в Львовском политехническом институте, и комплект высокочастотных пермеаметров. В приборе использованы два типа пермеаметров: одноконтурные и двухконтурные.

Одноконтурный пермеаметр, как элемент электрической цепи, представляет собой одновитковую тороидальную индуктивность, в переменное магнитное поле которой помещается испытуемый кольцевой образец феррита. Внесенный во внутреннюю полость образец увеличивает индуктивность пермеаметра и обуславливает дополнительные потери энергии магнитного поля. При резонансном методе измерений комплексное сопротивление между зажимами пермеаметра определяется через значения резонансной емкости и добротности, которые измеряются на куметре с вложенным в пермеаметр образцом и без него. Устройство одноконтурного пермеаметра показано на рис. 1. Пермеаметр состоит из корпуса 1 и крышки 2 с центральным стержнем 3.

Относительная магнитная проницаемость феррита μ и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ при измерениях с помощью одноконтурных пермеаметров рассчитываются по следующим формулам:

$$\mu - 1 = \frac{1}{\omega^2 L_0} \cdot \frac{C_n - C_0}{C_n \cdot C_0} = \frac{L_n}{L_0} \cdot \frac{C_n - C_0}{C_0},$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{Q_n} \cdot \frac{\frac{Q_n}{Q_0} C_n - C_0}{C_n - C_0} \cdot \frac{\mu - 1}{\mu},$$

где L_n ; C_n ; Q_n — индуктивность, резонансная емкость и добротность одноконтурного пермеаметра без испытуемого образца;

C_0 ; Q_0 — резонансная емкость и добротность пермеаметра при вложенном образце;

L_a — индуктивность геометрического пространства, занимаемого испытуемым образцом.

Индуктивность L_a определяется по формуле

$$L_a = 0,4606h \cdot \lg \frac{D}{d} \text{ мкГн},$$

где h — высота кольца в миллиметрах;

D — наружный диаметр кольца;

d — внутренний диаметр кольца.

Собственная индуктивность одноконтурного пермеаметра приемлемых размеров имеет порядок 0,01—0,1 мкГн; вследствие этого комплексное сопротивление его на низших частотах диапазона получается чрезвычайно малым. Поэтому в низкочастотные пермеаметры помещается дополнительная первичная то-

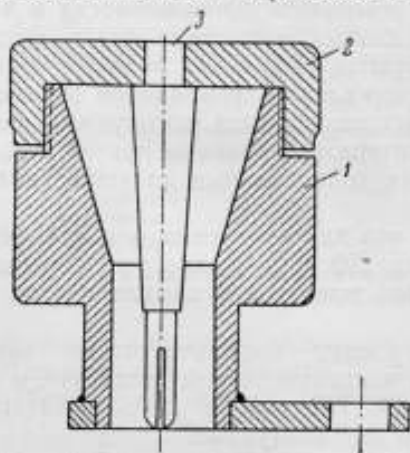


Рис. 1. Устройство одноконтурного пермеаметра.

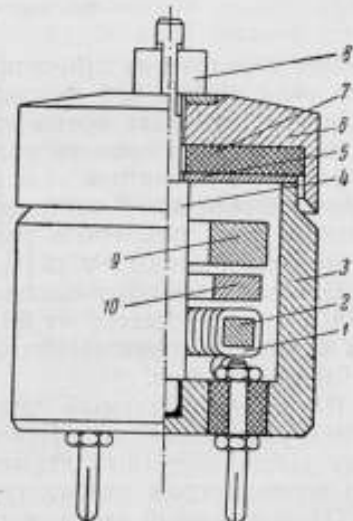


Рис. 2. Устройство двухконтурного пермеаметра.

роидальная обмотка, имеющая достаточно большое количество витков и индуктивно связанная с основным тороидальным разборным витком, который в данном случае будем условно считать вторичным. Очевидно, что двухконтурный пермеаметр можно рассматривать как трансформатор сопротивлений. С повышением частоты комплексное сопротивление вторичного витка пермеаметра повышается и требуемый коэффициент трансформации соответственно уменьшается.

Двухконтурные пермеаметры используются в диапазоне от 50 кГц до 50 МГц. На частотах выше 50 МГц требуемая оптимальная величина коэффициента трансформации приближается к единице и первичная обмотка в пермеаметре теряет смысл. Измерения на частотах 50—200 МГц проводятся при помощи одноконтурных пермеаметров.

Устройство двухконтурного пермеаметра показано на рис. 2. Первичная обмотка 1 выполняется на вспомогательном ферритовом сердечнике 2. Вторичный виток пермеаметра разборный и представляет собой латунный стакан 3 со средним стержнем 4 и закорачивающим диском 5. Надежность контакта диска с торцовой поверхностью стакана и средним стержнем обеспечивается специальной прижимной крышкой 6 с упругой эластичной прокладкой 7 и прижимным рычагом 8. Испытуемый образец 9 помещается во внутреннюю полость вторичного витка. Для обеспечения оптимальных условий измерений индуктивность вторичного витка двухконтурного пермеаметра должна иметь вполне определенную величину. При одинаковых геометрических размерах пермеаметров требуемая величина индуктивности вторичного витка достигается за счет введения дополнительного ферритового сердечника 10.

При изготовлении пермеаметров для получения удовлетворительных результатов при измерении $\operatorname{tg} \delta$ необходимо, чтобы потери энергии в элементах самого пермеаметра были как можно меньше, что достигается применением соответствующих материалов, чистотой обработки и серебрением поверхности внутренней полости пермеаметра и т. п. Следует отметить, что широкие пределы измерений и необходимую точность можно обеспечить, лишь применяя правильно рассчитанные и тщательно подогнанные пермеаметры. Особенности расчета пермеаметров рассмотрены в одной из работ автора [2].

Относительная магнитная проницаемость μ и тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta$ испытуемого феррита при измерениях с помощью двухконтурных пермеаметров рассчитываются по следующим формулам:

$$\mu - 1 = \frac{K}{L_a} \cdot \frac{C_k - C_0}{C_0 - C_x},$$

$$\operatorname{tg} \delta = \left[\operatorname{tg} \delta_{2x} + \frac{1}{Q_k} \cdot \frac{Q_k C_k - C_0}{C_k - C_0} - \frac{1}{Q_x} \cdot \frac{C_0 - \frac{Q_x}{Q_0} \cdot C_x}{C_0 - C_x} \right] \frac{\mu - 1}{\mu},$$

где $K = L_{2x} \frac{C_x}{C_k}$ — калибровочный коэффициент, имеющий размерность индуктивности;

$L_{2x}; Q_{2x} = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_{2x}}$ — индуктивность и добротность вторичного витка пермеаметра при разомкнутой первичной обмотке (измеряется при первоначальной калибровке пермеаметров);

$C_k; Q_k$ — резонансная емкость и добротность, измеренные на зажимах первичной обмотки пермеаметра при закороченном вторичном витке без испытуемого образца;

$C_x; Q_x$ — резонансная емкость и добротность, измеренные на зажимах первичной обмотки при разомкнутом вторичном витке без образца;

$C_0; Q_0$ — резонансная емкость и добротность, измеренные на зажимах первичной обмотки с вложенным испытуемым образцом при закороченном вторичном витке.

Закорачивание и разрыв вторичного витка пермеаметра производятся при помощи закорачивающего диска, съемной крышки и прижимной вилки (рис. 2). Измерения резонансной емкости и добротности пермеаметров производятся на куметре. Пермеаметр используется как сменная индуктивность колебательного контура, в который входят

также емкость измерительного конденсатора и сопротивление связи с генератором. При достаточном количестве сменных пермеаметров измерения можно производить на любой из частот указанного выше диапазона.

С целью определения возможности повышения точности измерений, а также для существенного расширения пределов измерений μ и $\text{tg } \delta$ был разработан специальный куметр ИПФМ. Функциональная схема куметра ИПФМ показана на рис. 3. В куметре предусмотрен ряд мер, расширяющих возможность применения резонансного метода для испытания ферромагнитных материалов в широком диапазоне частот.

К измерительному контуру куметра от высокочастотного генератора ГВИ подводится амплитудно-модулированное напряжение. Модуляция осуществляется прямоугольными импульсами с частотой повторения 50 гц. Частота повторения и длительность модулирующих импульсов выбраны так, чтобы не возникала дополнительная погрешность измерения добротности.

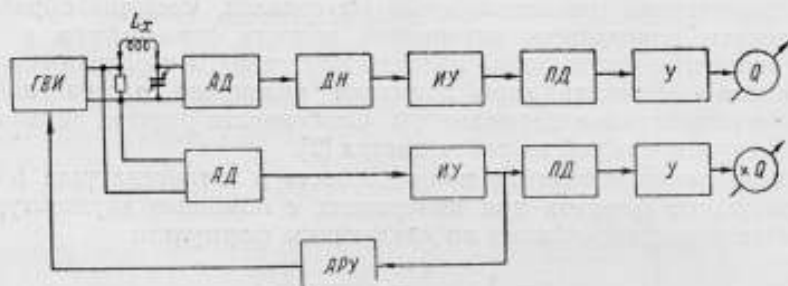


Рис. 3. Функциональная схема куметра.

Подводимое к контуру напряжение измеряется ламповым вольтметром непосредственно на зажимах сопротивления связи. Напряжение, пропорциональное Q контура, измеряется вторым ламповым вольтметром, подключенным к зажимам измерительного конденсатора. Оба вольтметра собраны по идентичным схемам. Различие между ними в том, что в Q -вольтметр из-за большего диапазона измеряемых напряжений введен дополнительный делитель напряжения ДН.

Входная ступень каждого из вольтметров является анодным детектором АД. Изменением режима и дополнительным делителем ДН обеспечиваются измерения Q на четырех пределах, что дает высокую разрешающую способность шкалы добротности. Высокая стабильность усилителей импульсов низкой частоты ИУ достигается введением глубокой обратной связи. С выхода пиковых детекторов ПД напряжение подводится к усилителям У постоянного тока, которые используются для согласования высокоомных выходов пиковых детекторов с низким сопротивлением стрелочных приборов.

Для того чтобы во время настройки измерительного контура в резонанс подводимое к контуру напряжение оставалось неизменным в куметр ИПФМ введено автоматическое регулирование уровня АРУ. Схема АРУ представляет собой усилитель—ограничитель, на вход которого подается импульсное напряжение от вольтметра уровня входного напряжения. Помимо автоматического регулирования уровня предусмотрено ручное, которое осуществляется изменением ограничения в каскаде АРУ.

В результате проведенных испытаний прибора ИПФМ была установлена возможность измерения относительной магнитной проницаемости ферритов на низших частотах рабочего диапазона с предельной

погрешностью не более $\pm 3\%$ и на высших частотах — не более $\pm 5\%$. Предельная погрешность измерения тангенса угла потерь ферритов не превышала $\pm (7\% \pm 0,001)$ на низших частотах и $\pm (10\% \pm 0,002)$ — на высших; при этом измерения магнитной проницаемости обеспечиваются в пределах от нескольких единиц до 10 000, а пределы тангенса угла потерь $0,5 \pm 0,002$.

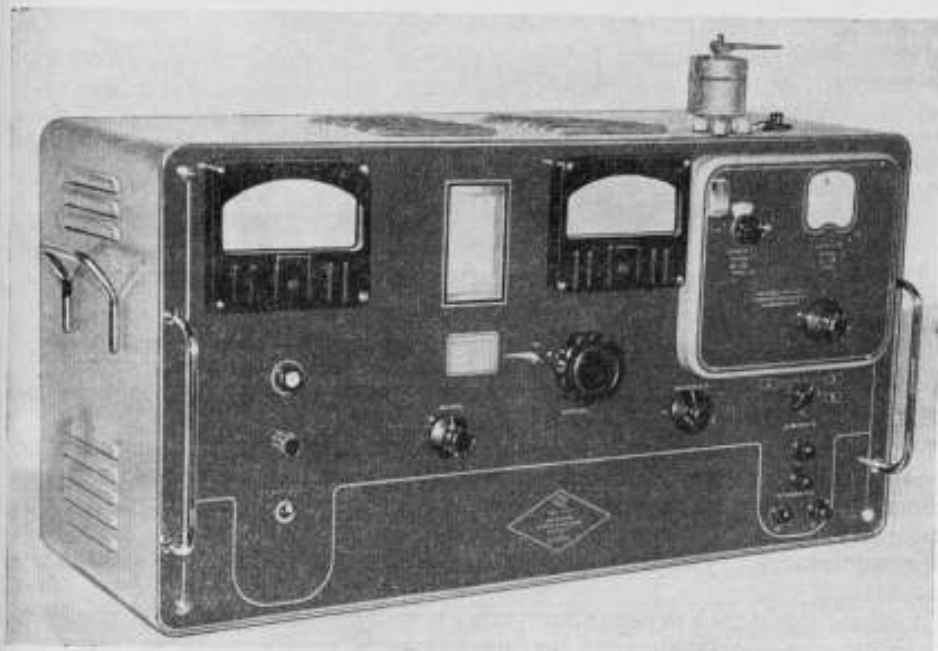


Рис. 4. Внешний вид куметра.

Внешний вид экспериментального образца прибора ИПФМ показан на рис. 4. В лаборатории института была проведена исследовательская работа по определению возможности дальнейшего усовершенствования прибора и повышения точности измерений. Исследования дали положительные результаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рабкин Л. И., Высокочастотные ферромагнетики, Физматгиз, 1960.
2. Мушкарден Э. М., Вопросы электронной измерительной техники, Научные записки ЛПИ, вып. 78, 1960.

Л. И. РАБКИН, Н. П. ГОРЯЧЕВ

ИМПУЛЬСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

В статье описан разработанный авторами прибор, предназначенный для наблюдения в импульсном режиме отдельных магнитных характеристик и определения ряда параметров импульсного частотного цикла.

Ферромагнитные сердечники, в частности ферритовые, широко используются для изготовления импульсных трансформаторов, катушек линий временной задержки, запоминающих и других устройств. В связи с этим вопросом измерения таких параметров, как импульсная проницаемость, удельные потери и т. д., являются весьма актуальными.

Максимальный перепад индукции и импульсная проницаемость ферромагнетика в зависимости от приращения напряженности поля ΔH могут быть получены, например, путем воздействия на катушку с сердечником импульсами напряжения прямоугольной формы; при этом амплитуда тока в обмотке определяет максимальное значение напряженности поля в образце, а длительность импульса (при данном числе витков) — перепад индукции ΔB .

При уменьшении длительности импульсов обнаруживается зависимость импульсной проницаемости не только от ΔH , но и от длительности импульсов. Для снятия такой зависимости на катушку с сердечником воздействуют кратковременными импульсами тока заданной формы. В этом случае интеграл э. д. с., возникающей в катушке при перемагничивании сердечника, является мерой индукции в нем.

Удельные потери в импульсном режиме характеризуются площадью динамической импульсной петли перемагничивания. С уменьшением длительности импульсов потери в сердечнике возрастают [1].

Сердечники для запоминающих устройств с прямоугольной петлей гистерезиса обычно испытываются по определенным импульсным программам в условиях, близких к реальным.

При исследовании свойств магнитных материалов для применения в автоматике, вычислительной технике и аппаратуре АТС с бесконтактной коммутацией очень существенным является наблюдение петли перемагничивания в динамических условиях. В течение последних лет для этой цели используется разработанный в НИИТС [2] электронно-лучевой феррометр для непрерывных синусоидальных полей. Этот феррометр позволяет производить наблюдения петли перемагничивания при частотах от 50 гц до 200 кгц.

Из динамической петли перемагничивания, помимо удельных потерь, можно определить также ряд других параметров сердечника, таких, как динамическая коэрцитивная сила, коэффициент прямоугольности петли и т. д.

В ряде случаев применения магнитных материалов полученная петля полностью соответствует условиям работы высокочастотных сердечников. Примером могут служить сердечники нелинейных катушек, применяемых в аппаратуре дальней связи, в некоторых магнитных усилителях и т. д.

Однако в большинстве случаев в новых отраслях техники (АТС с бесконтактной коммутацией, вычислительной технике и др.) высокочастотные сердечники работают не в синусоидальных, а в импульсных режимах и авторам новых разработок приходится по результатам изме-

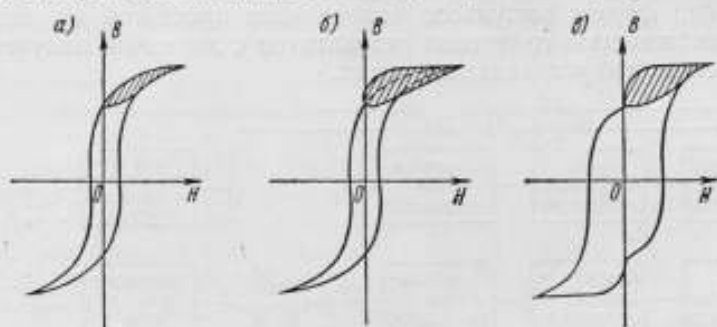


Рис. 1. Различные импульсные характеристики ферромагнитного материала: а — статическая; б — динамическая первого рода; в — динамическая второго рода.

рений сердечников в синусоидальных полях предположительно судить об их свойствах в импульсных полях. При этом часто имеет место большой произвол, поскольку сравнение сердечников в синусоидальных и импульсных полях производится по каким-то условными признакам. Так, например, при применении сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса, техническими условиями задаются параметры B_{\max} , $\frac{B_r}{B_{\max}}$ и H_c при частоте 30 кГц только потому, что длительность импульса (довольно сложной формы) соответствует времени перемагничивания при синусоидальном переменном токе с частотой 30 кГц.

Возникает вопрос, является ли правильным и целесообразным такое сравнение параметров сердечников, полученных по измерениям на феррометре, с условиями применения сердечников в импульсных полях. Для ответа на этот вопрос потребовалось разработать методику и соответствующую аппаратуру для наблюдения петли перемагничивания в импульсных полях и измерения импульсных параметров. Потребовалось учесть также то обстоятельство, что при использовании магнитных материалов в импульсных полях часто требуется наблюдать сочетание рабочей импульсной характеристики с петлей перемагничивания — функции, получившей название полной импульсной характеристики. Следует делать различие между полной статической импульсной характеристикой, которая может быть получена по точкам баллистическим методом, и полной динамической импульсной характеристикой первого и второго рода (рис. 1).

Полная динамическая импульсная характеристика первого рода представляет собой сочетание петли гистерезиса и частного динамического импульсного цикла, тогда как динамическая импульсная харак-

характеристика второго рода представляет собой сочетание динамической петли перемагничивания и динамического частного цикла, полученных в импульсных полях. Полная динамическая импульсная характеристика второго рода может быть получена при перемагничивании сердечника сериями из трех одинаковых импульсов тока достаточно малой длительности, два из которых имеют одно направление, а третий — противоположное [3]. Длительность импульсов, при которых кривая перемагничивания начинает отклоняться от статической, для разных магнитных материалов различна и тем меньше, чем меньше потери на магнитную вязкость, вихревые токи и другие магнитные потери в сердечнике.

При разработке импульсного феррометра для получения полной динамической импульсной характеристики второго рода авторами была выбрана полусинусоидальная форма импульсов намагничивающего тока. Выбор формы импульсов определялся простотой их генерирования и возможностью сравнения результатов с данными, полученными в периодических синусоидальных полях.

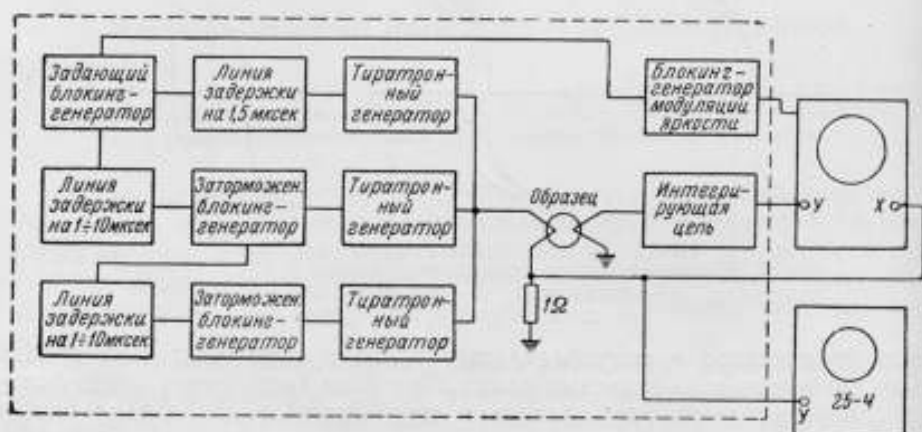


Рис. 2. Блок-схема импульсного феррометра.

Полная динамическая импульсная характеристика получается на экране осциллографа при помощи приставки, состоящей в основном из программного устройства, обеспечивающего получение нужной серии импульсов тока, и ламповой интегрирующей схемы.

Блок-схема установки показана на рис. 2. Электрические импульсы получают при помощи тиратронных генераторов с контурами ударного возбуждения в анодных цепях, которые запускаются от задающего блок-интервала-генератора через переменные линии временной задержки. Тем самым обеспечивается возможность регулирования временных интервалов между импульсами. Длительность и амплитуда каждого из импульсов серии регулируется отдельно. Сохраняя амплитуды двух импульсов разной полярности одинаковыми и изменяя третий импульс по амплитуде от минимальной величины до максимальной, можно по точкам определить импульсную кривую намагничивания, а по последней — зависимость импульсной проницаемости от напряженности поля.

Интегрирующая схема предназначена для преобразования напряжения во вторичной обмотке образца, которое пропорционально скорости изменения индукции, в напряжение, пропорциональное индукции. Параметры интегрирующей схемы выбраны из условий достаточно точного интегрирования всей серии импульсов: $RC > 10T_c$, где T_c — продолжительность серии из трех импульсов при максимальных интервалах между ними.

Усилители осциллографа должны иметь полосу пропускания, достаточную для неискаженной передачи спектров импульсов. Кроме того, выходные напряжения усилителей в каналах H и B должны совпадать по фазе в широком диапазоне частот.

В разработанном в НИИТС импульсном феррометре используются полусинусоидальные импульсы тока, длительность которых может принимать значения 2 или 5 мксек. Амплитуда каждого импульса плавно регулируется $0,2 \div 1,0$ а, а временной интервал между каждым предыдущим и последующим импульсами может изменяться $0 \div 10$ мксек через 1 мксек.

В установке использован двухлучевой осциллограф, усилители которого имеют полосу пропускания от 3 гц до 1 мксек.

При помощи двухлучевого осциллографа, кроме зависимости $B=f(H)$, можно наблюдать и фотографировать также кривые $B=f(t)$ и $H=f(t)$.

Импульсный феррометр наряду с наблюдением полных импульсных характеристик ферромагнетиков позволяет также определять ряд их параметров. Так, с его помощью можно измерить разность $B_{\max} - B_r$, из которой может быть определена импульсная проницаемость

$$\mu_{\text{имп}} = \frac{B_{\max} - B_r}{H_{\max}}$$

величина, весьма существенная при расчете импульсных трансформаторов. Отношение $\frac{B_r}{B_{\max}}$ в импульсном режиме — импульсная относительная остаточная индукция — является важной характеристикой при использовании ферромагнетиков во многих схемах новых систем АТС.

Импульсная характеристика позволяет также определять потери энергии при импульсном перемагничивании сердечников. Площадь петли статического частного цикла полной импульсной характеристики представляет собой потери на гистерезис при импульсном перемагничивании в соответствии с законом Варбурга

$$W_r = \frac{1}{4\pi} \oint_{H_1} B dH,$$

тогда как площадь частного цикла полной динамической импульсной характеристики определяет собой общие потери на перемагничивание по частному динамическому импульсному циклу

$$W_{\text{дин}} = \frac{1}{4\pi} \oint_{H_{\text{дин}}} B_{\text{дин}} dH_{\text{дин}}.$$

Площадь импульсного частного цикла может быть определена планиметрированием или путем взвешивания изображения петли на точных весах, если плотность фотобумаги принять равномерной.

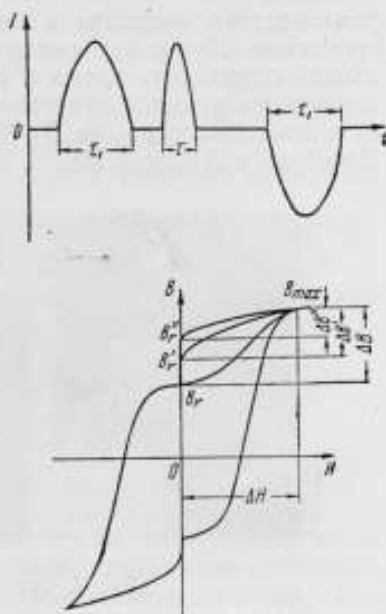


Рис. 3. Программа импульсов и импульсная петля перемагничивания:

точка B_r соответствует импульсу длительностью τ_1 ; точка B_r' соответствует импульсу длительностью τ_2 .

Очень интересной особенностью характеристик, полученных при помощи импульсного феррометра, является то, что полная импульсная характеристика вещества с большой магнитной вязкостью при определенной длительности импульсов имеет «ступеньку» при $H=0$ (рис. 3). Эта ступенька является результатом того, что за время между двумя импульсами индукция спадает до значения B_r от некоторого значения B_r' , которое она принимает в момент окончания предыдущего импульса.

Полученная разность $B_r' - B_r$ является важным параметром ферромагнитного вещества и зависит от протекающих в нем вязкостных процессов. Путем изменения временного интервала между импульсами можно определять время t , необходимое для того, чтобы индукция в сердечнике приняла значение B_r . Измерение времени t можно производить по осциллограмме $B=f(t)$, аналогично тому, как описано в работе Джеруло и Хобсона [4].

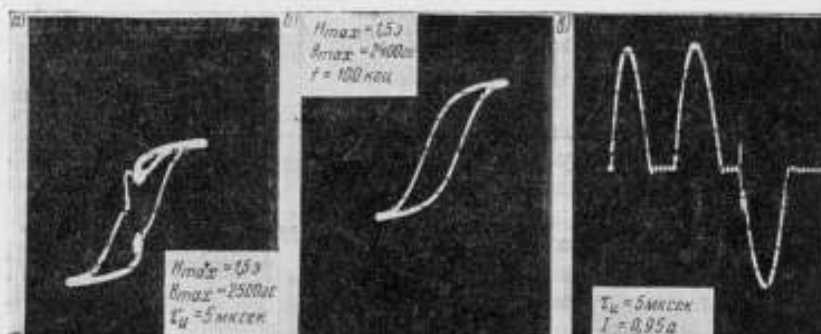


Рис. 4. Осциллограммы феррита НИ-3000.

На рис. 4, а представлена осциллограмма полной импульсной характеристики феррита НИ-3000 при напряженности поля $H_{\max} = 1,5$ э; на рис. 4, в — соответствующая ей программа импульсов тока ($\tau_n = 5$ мксек); на рис. 4, б — осциллограмма петли перемагничивания того же сердечника на частоте 100 кГц в синусоидальном поле той же напряженности. Интересно отметить, что петли перемагничивания в импульсных полусинусоидальных полях в отдельных случаях достаточно хорошо совпадают по форме с динамическими петлями в непрерывных синусоидальных полях. Сравнение непрерывного режима перемагничивания с импульсным показало, что в первом случае вследствие нагрева может произойти изменение магнитных свойств образца. Если влияние нагрева на свойства сердечника невелико, то кривая $B=f(H)$ в точках $H=0$ проходит выше B_r вследствие вязкостных процессов.

Таким образом, можно считать целесообразным сравнение свойств в синусоидальных и импульсных полях только в тех случаях, когда не сказываются указанные факторы.

В заключение следует отметить, что метод получения полных динамических импульсных характеристик представляется перспективным и после дальнейшего усовершенствования может оказаться весьма полезным в практике магнитных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Th. Einsele, Frequenz, N 10, 1953.
2. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики, Физматгиз, 1960.
3. Рабкин Л. И., Эбанзидзе Е. В., Исаева З. А., Горячев Н. П. «Способ испытания ферритов», Авт. свидетельство № 119935 1958 г.
4. Джеруло и Хобсон, «Вопросы радиолакационной техники», ИЛ, 1/31, 1956.

Е. И. ГУРВИЧ, Л. Б. ШУКИН

О ВЫБОРЕ СИСТЕМЫ ПАРАМЕТРОВ И МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЯ БОЛЬШИХ КОЛИЧЕСТВ ФЕРРИТОВЫХ СЕРДЕЧНИКОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЦИФРОВЫХ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

В статье дается обоснование выбора статических и импульсных магнитных параметров ферритовых сердечников, используемых в цифровых автоматических устройствах. Рассматриваются методы и измерительные устройства, рекомендуемые для определения различных импульсных характеристик.

Ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса находят все более широкое применение для создания различных цифровых устройств электронной автоматики и вычислительной техники. Поскольку сердечники используются в больших количествах, исчисляемых тысячами даже в одном изделии, возникает задача выбора и обоснования способов их производственного контроля. Эта задача, прежде всего, связана с выбором основных параметров, характеризующих качество сердечников, а затем и с выбором методики их контроля. Методика должна быть простой, удобной при контроле больших количеств сердечников малых размеров (наружный диаметр 2-3 мм), а также должна обеспечивать требуемую точность при минимальном количестве измерений. Необходимо также, чтобы методика проверки была достаточно полной; последнее означает, что комплекс измерений при контроле в процессе производства должен гарантировать с определенной достоверностью как допустимое количество брака на последующих стадиях производства изделий, использующих ферритовые сердечники, так и качество аппаратуры в процессе эксплуатации.

В связи с этим вся совокупность проверок в процессе производственного контроля подразделяется на 100-процентные, выборочные и периодические (типовые) испытания. Такое разделение приходится проводить по той причине, что полная проверка всех параметров является очень трудоемкой и практически не может быть выполнена для каждого сердечника в отдельности. Поэтому в процессе 100-процентных испытаний проверяются основные параметры сердечников, а в процессе выборочных испытаний производится измерение дополнительных параметров у отдельных образцов, предварительно прошедших 100-процентные испытания. По результатам выборочных испытаний затем окончательно характеризуется качество всей партии ферритовых сердечников в целом.

Периодические (типовые) испытания проводятся реже, один раз в квартал (полугодие) и предназначаются для контроля менее важных параметров.

Сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса, применяемые в цифровых автоматических и вычислительных устройствах, могут быть разделены на две основные группы: сердечники, используемые в оперативных запоминающих устройствах, и сердечники, используемые в переключающих режимах. К последним относятся сердечники, намагничивание которых осуществляется в полях, превышающих коэрцитивную силу в 2÷3 раза и более. Ниже рассматриваются измерения только таких сердечников.

Все параметры, характеризующие ферритовые сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса, используемые в переключающих режимах, разделяются на две группы: статические характеристики петли гистерезиса и импульсные параметры.

К первой группе относятся коэрцитивная сила H_c , максимальная индукция B_{max} в поле H_{max} , коэффициент прямоугольности $K_{пр} = \frac{B_r}{B_{max}} = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{стат}}$, где $\rho_{стат} = \frac{B_{max}}{H_{max}}$, а $\rho_{нас} = \frac{B_{max} - B_r}{H_{max}}$ и наконец, точка Кюри T_c° .

Во вторую группу входят импульсные параметры, характеризующие свойства сердечников в режимах переключения.

Параметры ферритового сердечника, входящие как в первую, так и во вторую группу, характеризуются также температурной стабильностью, т. е. изменениями их значений в крайних точках рабочего диапазона температур.

Среди импульсных параметров для контроля сердечников должны быть выбраны такие, которые, с одной стороны, позволяют проводить расчеты электрических цепей с такими сердечниками, а с другой стороны, являются физическими параметрами, характеризующими качество материала сердечников.

Расчет электрических цепей может быть проведен в общем случае достаточно полно, если известна вольтамперная характеристика сердечника в условиях импульсного намагничивания. Для каждого отдельного сердечника такая характеристика не может быть измерена при массовых измерениях, поэтому необходимо выделить основные параметры, определяющие эту характеристику. Эти параметры выбираются из следующих соображений. Из многочисленных работ, выполненных отечественными и зарубежными исследователями [1—5], известно, что при воздействии на сердечники с ППГ импульса поля амплитудой напряженности $H_{max} (2÷3) H_c$, перемагничивание сердечника определяется соотношением

$$e \sim \frac{dB}{dt} = f(B) \cdot (H_{max} - H_0). \quad (1)$$

Различными авторами предлагаются различные выражения для функции $f(B)$, однако следствия соотношения (1), которые оказываются достаточными для многих расчетов, являются общими и хорошо подтверждаются экспериментом:

$$\tau = \frac{S_w}{H_{max} - H_0}, \quad e_c = k (H_{max} - H_0),$$

где e_c — амплитудное значение э. д. с. сигнала при перемагничивании сердечника разнополярными импульсами поля прямоугольной формы и амплитудой H_{max} ;

τ — время перемагничивания в таком режиме;
 S_w — коэффициент переключения;
 H_0 — напряженность порогового поля.

Эти параметры входят в расчеты цепей и поэтому желательно знать их величины во всем интервале возможных изменений полей, для чего необходимо определение S_w , H_0 и коэффициента k .

Указанная система параметров дополняется еще одним, не вытекающим из выражения (1). Этим параметром является амплитудное значение э. д. с. помехи e_n при намагничивании сердечника однополярными импульсами тока прямоугольной формы с фиксированным значением длительности того фронта, на котором измеряется e_n . Иными словами, для составления характеристики сердечника при одном фиксированном значении поля H_{max} необходимо определять параметры τ , e_c и e_n , а для характеристики во всем диапазоне полей — S_w , H_0 и k .

Параметры S_w и k , вообще говоря, связаны между собой через значение остаточной индукции и другие величины не могут задаваться независимо; поэтому минимально необходимой системой импульсных параметров является совокупность параметров S_w и H_0 , определяющих время перемагничивания во всем интервале изменения полей, а также значения τ , e_c и e_n при одном фиксированном значении напряженности поля H_{max} и фиксированной длительности фронта. Зная e_c и e_n для одного значения H_{max} и параметр H_0 , можно рассчитывать величины e_c и e_n и для других значений напряженности поля H_{max} *

Измерения S_w и H_0 являются весьма трудоемкими и производятся только при выборочных испытаниях. При 100-процентных испытаниях осуществляется контроль сердечников по значениям времени перемагничивания τ , э. д. с. сигнала e_c и э. д. с. помехи e_n при фиксированном значении напряженности поля H_{max} .

При 100-процентных испытаниях годными к применению признаются лишь те сердечники, параметры которых e_c и τ находятся в пределах заданных допусков. Допустимые величины отклонения этих параметров в обе стороны от номинальных значений определяются при расчете элементов и должны быть устойчивыми от партии к партии, что обеспечивается принятой технологией изготовления сердечников. Величина э. д. с. помехи e_n при проверке ограничивается только сверху, так как чем меньше величина помехи, тем лучше качество сердечника.

100-процентные испытания больших количеств ферритовых сердечников удобно выполнять на специальном приборе, для измерения на котором не требуется предварительно производить намотку сердечника. Проверка сердечников производится с помощью специального коммутационного ключа, содержащего два изолированных друг от друга проводника, по которым пропускаются перемагничивающие импульсы тока. Измерения проводятся на одном витке, образуемом каждым проводником, который пронизывает сердечник; вследствие этого от генератора требуются перемагничивающие импульсы тока значительной амплитуды (до 1,0—2,0 а).

Электрическая схема проверки сердечников в импульсном режиме по трем параметрам: e_c , e_n и τ — приводятся на рис. 1. Лампы выходных каскадов нормально заперты отрицательным смещением на сетках:

* Строго говоря, величины S_w и H_0 зависят от напряженности поля [6], однако эта зависимость проявляется только при очень больших изменениях H_{max} и для ферритовых сердечников, используемых в переключающих режимах в полях, превышающих коэрцитивную силу в несколько раз (но не в десятки раз), S_w и H_0 могут считаться постоянными.

при поступлении сдвинутых во времени импульсных сигналов Γ_1 и Γ_2 соответствующая из ламп отпирается, и конденсатор разряжается через нее, обеспечивая требуемый импульс тока в $1,0 \div 2,0$ а.

Для правильных измерений амплитуда импульсов не должна изменяться, длительность импульсов должна превышать время перемagnetизации τ , а длительность переднего фронта должна быть значительно меньше τ . Оба последних требования обусловлены необходимостью исключить влияние процесса изменения поля на наводимую э. д. с. Контроль параметров импульсов тока производится на сопротивлениях $R_{\text{ном}}$ с помощью импульсного вольтметра V .

Внешняя синхронизация осциллографа от одного из генераторов Γ_1 позволяет производить наблюдение на осциллографе как сигнала пере-

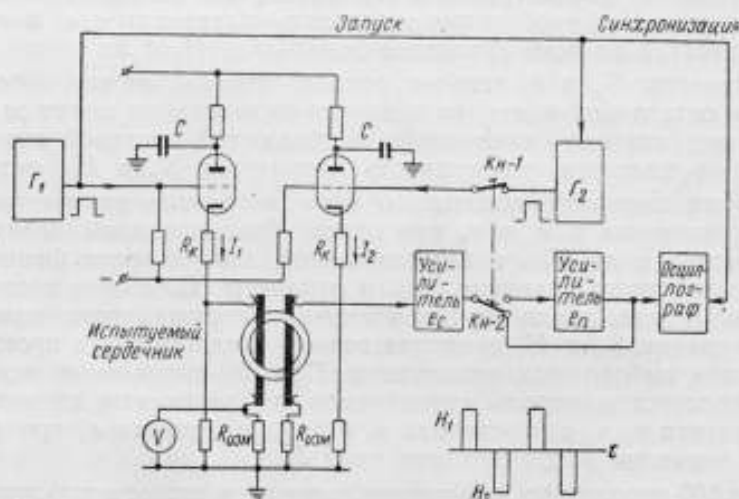


Рис. 1. Электрическая схема проверки ферритового сердечника в импульсном режиме при 100-процентных испытаниях.

магнитизации, так и помехи на одном из фронтов импульса тока I_1 , т. е. в обоих положениях кнопки Кн-1. Для удобства измерений при проверке э. д. с. помехи в тракт усиления дополнительно включается еще один усилитель — усилитель помехи, имеющий коэффициент порядка $10 \div 15$. Это дает возможность визуально оценивать э. д. с. помехи на осциллографе в увеличенном масштабе по сравнению с э. д. с. сигнала, что существенно повышает точность и облегчает процесс измерений больших количеств сердечников.

В положении, изображенном на схеме, производится проверка по осциллографу э. д. с. сигнала e_c и времени перемagnetизации τ в заданном поле; значение э. д. с. помехи e_n измеряется при разомкнутой кнопке Кн-1 и в верхнем положении кнопки Кн-2.

Как видно из схемы на рис. 1, измерение параметров сердечника производится со вторичной обмотки, в которой в момент измерения ток I_2 отсутствует (синхронизация осциллографа производится сигналами от генератора Γ_1), поэтому во вторичной обмотке, которая в момент прохождения тока является измерительной, имеется лишь наведенная э. д. с. (сигнала или помехи). Это дает возможность производить значительно более точные измерения по сравнению с методом использования только одной обмотки, являющейся одновременно и измерительной и намагничивающей, так как в схеме рис. 1 в момент измерения во вторичной обмотке отсутствуют падение напряжения на активном сопро-

тивлении и переходном контакте коммутационного ключа, которые могут быть соизмеримы или даже превышать э. д. с. помехи.

Усилители в приборе должны быть весьма широкополосными, так как длительность измеряемых импульсов помехи и сигнала составляет обычно 0,2–3,0 мксек; сами импульсы имеют не прямоугольную форму, а близкую к треугольной, для правильного наблюдения амплитуды которых требуется значительно большая полоса пропускания, чем для импульсов прямоугольной формы.

Для обеспечения независимости выходных токов I_1 и I_2 от величины сопротивления сердечника в процессе перемагничивания, а также от переходного сопротивления контакта в коммутационном ключе, приходится применять относительно большие сопротивления R_k в катодах ламп; практически для контроля должно быть не менее 50–100 ом.

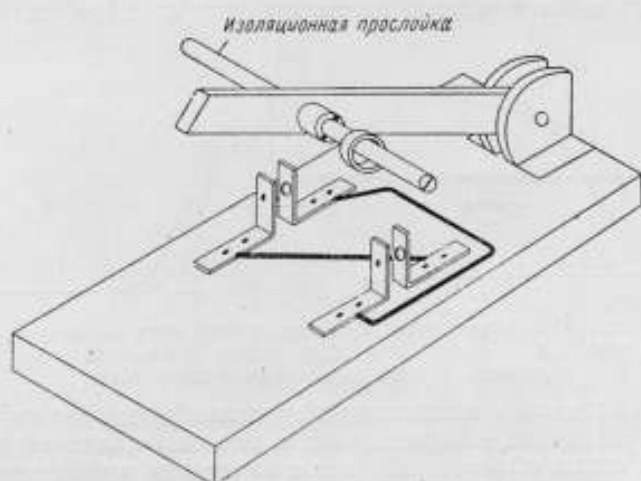


Рис. 2. Внешний вид коммутационного ключа.

Установка амплитуд токов I_1 и I_2 может быть произведена независимо друг от друга и определена требуемым режимом перемагничивания.

Внешний вид коммутационного ключа приводится на рис. 2. Оба провода конструктивно соединены в один стержень, разрезанный вдоль на две половины с изоляцией между ними. Испытуемый ферритовый сердечник надевается на него в поднятом положении ключа, затем ключ опускают вниз, замыкая контакты, после чего производят измерения.

Жесткая механическая конструкция коммутационного ключа позволяет разместить компенсационные проводники в токоподводящих цепях, чем обеспечивается резкое снижение уровня собственных помех в приборе. Последнее особенно важно при измерении э. д. с. помех; уровень помех в приборе можно считать допустимым, если он, по крайней мере, раз в 20–25 меньше контролируемой э. д. с. помехи e_n .

Стенд по рассмотренной схеме выполнен в виде небольшого переносного прибора. Он используется в различных конструктивных вариантах уже несколько лет. Его производительность составляет около 1000 шт. за смену.

При массовых производственных измерениях градуировка прибора и осциллографа производится путем контроля параметров образцового ферритового сердечника; в процессе измерений стабильность прибора также периодически проверяется по показаниям образцового сердечника, чем обеспечивается надежная проверка всей партии сердечников.

Иными словами 100-процентная проверка проводится путем сравнения сигналов на осциллографе от испытуемого и образцового сердечников, вследствие этого, несмотря на простоту изложенного метода, он может быть использован на практике только при условии существования объективной методики измерения абсолютных значений параметров e_c , e_n и τ с целью отбора образцов сердечников.

Объективная методика предполагает, что абсолютные значения параметров, измеренных на разных установках, но при одном и том же значении напряженности поля, будут одинаковыми. Применительно к таким параметрам, как э. д. с. сигнала e_c и время перемангничивания выполнение объективных измерений не вызывает затруднений. Необходимо только, чтобы длительность фронта импульсов тока была существенно меньше времени перемангничивания сердечников. Измерения e_c и τ могут производиться как с помощью рассмотренного прибора, так и другими

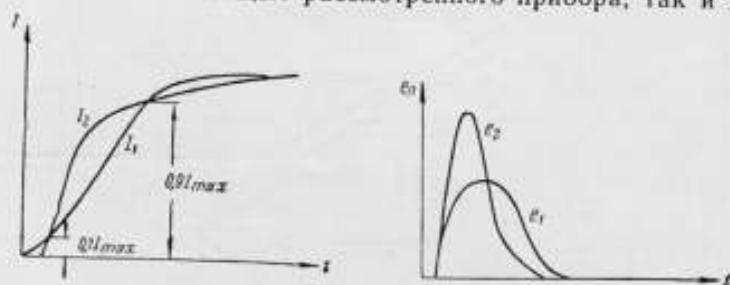


Рис. 3. Влияние характера нарастания тока на величину э. д. с. помехи при одинаковых значениях длительности фронта намагничивающего тока.

известными методами с использованием стандартной аппаратуры и нанесением на сердечник измерительной и намагничивающей обмоток.

В то же время объективный метод измерения амплитудного значения э. д. с. помехи e_n , необходимый для отбора образца, является весьма затруднительным. Объясняется это тем, что э. д. с. помехи e_n зависит не только от приращения потока $\Delta\Phi$, но и от крутизны фронта нарастания (спадания) намагничивающего тока; поэтому точные измерения абсолютных значений э. д. с. помехи e_n могут быть обеспечены по вышесказанной методике лишь в том случае, если крутизна фронта намагничивающего импульса является постоянной. Однако формирование импульса тока большой амплитуды (до 1,5—2,0 а) с фиксированным значением крутизны, т. е. линейности фронта, представляет, в свою очередь, весьма сложную задачу; затруднительным также является и точное измерение линейности фронта импульса. Неточность в определении крутизны фронта импульса приводит к недопустимо большим погрешностям определения амплитудного значения э. д. с. помехи e_n . В частности, при одинаковых длительностях фронта, но разным характере нарастания тока (рис. 3) абсолютные значения э. д. с. помехи будут существенно различными, хотя сердечники имеют одинаковые значения $\Delta\Phi$. Отсюда видно также, насколько несостоятельным является задание в ряде случаев такого параметра, как отношение сигнала к помехе. Если один и тот же сердечник испытывается на разных стендах при одном и том же значении H_{max} , то величина э. д. с. сигнала и времени перемангничивания, измеренные на разных стендах, совпадут. Однако при разной длительности переднего фронта или, как было сказано выше, при одинаковой длительности, но разным характере нарастания тока (рис. 3) значения э. д. с. помехи, а следовательно, и отношения э. д. с. сигнала к э. д. с. помехи будут существенно различными.

По указанным причинам в качестве образца, с которым производится сравнение по величине э. д. с. помехи при 100-процентных испытаниях, принимается сердечник с фиксированным значением коэффициента прямоуглости, т. е. с фиксированным значением приращения потока $\Delta\Phi$ при однополярном намагничивании в поле заданной амплитуды H_{\max} . Измерения $\Delta\Phi$ производятся следующим образом (рис. 4). В сердечнике создается постоянное намагничивающее поле $\frac{1}{2}H_{\max}$, на которое накладывается синусоидальное магнитное поле, также с амплитудой $\frac{1}{2}H_{\max}$, так что суммарное поле, действующее на сердечник, изменяется от 0 до H_{\max} .

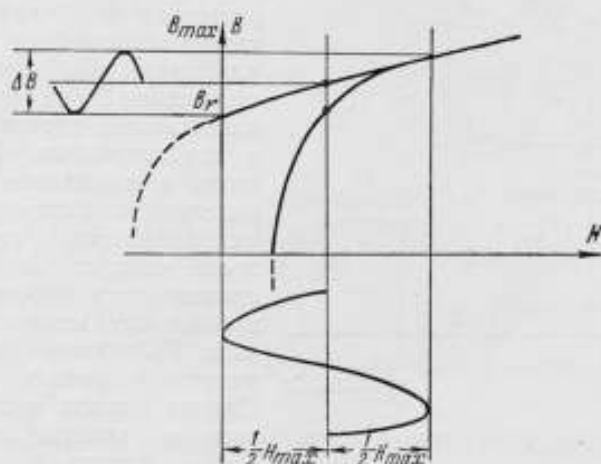


Рис. 4. Принцип измерения приращения потока $\Delta\Phi$ при однополярном намагничивании.

Измеряя среднее значение э. д. с. $E_{\text{ср}}$, можно определить приращение потока $\Delta\Phi$ на этом участке по формуле

$$\Delta\Phi = \Delta B \cdot A = -\frac{2E_{\text{ср}}}{4f\omega_2} \cdot 10^8 \text{ мкс.}$$

Для того чтобы измерения $\Delta\Phi$ проводились в условиях, близких к реальным условиям работы сердечников, перед наложением однополярного поля H_{\max} сердечник устанавливается в состояние B путем двуполярного перемагничивания прямоугольными импульсами поля той амплитуды, при которой производится измерение э. д. с. сигнала и времени перемагничивания.

Электрическая схема по такой методике приводится на рис. 5. В этой схеме используется следующая аппаратура: Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 — генераторы прямоугольных импульсов, включенные таким образом, что каждому импульсу запуска от синхронизирующего генератора Γ_1 соответствуют обязательно два импульса (один от Γ_2 , а другой от Γ_3); Γ_4 — генератор синусоидального напряжения, образующий совместно с $R_{\text{доб}}$ генератор тока, поскольку $R_{\text{доб}} \gg R_{\text{взм}}$; V_1 — вольтметр переменного тока; V_2 — импульсный вольтметр (пиковый);

Измерения проводятся в следующей последовательности:

1) Устанавливается амплитуда синусоидального тока от Γ_4 , соответствующая значению переменного поля $\frac{1}{2}H_{\max}$; измерения проводятся вольтметром V_2 .

2) Переключатель Π_1 переводится в положение 1, замыкается кнопка Кн-1 и от импульсных генераторов Γ_2 и Γ_3 устанавливаются амплитуды токов, соответствующие значениям напряженности полей, при которых контролируются e_c и τ ; измерения проводятся также вольтметром V_2 .

3) Переключатель Π_2 переводится в положение 1 и устанавливается постоянный ток I_0 , равный амплитуде синусоидального тока.

В результате выполнения перечисленных операций от всех источников питания установлены требуемые величины токов и сердечник подвергается двуполярному перемагничиванию прямоугольными импульсами поля.

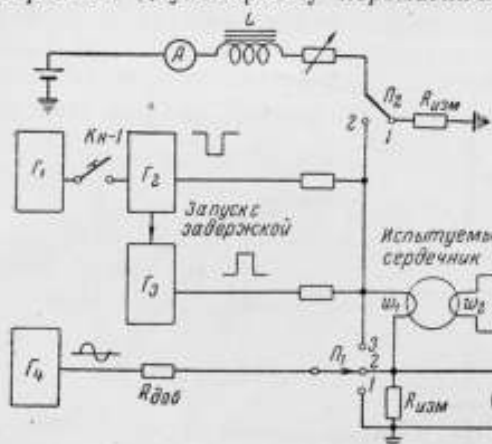


Рис. 5. Электрическая схема измерений $\Delta\Phi$.

Далее кнопка Кн-1 размыкается (сердечник остается в состоянии $+B_r$, переключатель Π_2 переводится в положение 2 (на сердечник накладывается постоянное поле) и переключатель Π_1 переводится в положение 3 (дополнительно к постоянному полю накладывается переменное), после чего по вольтметру V_1 производится отсчет $E_{ср}$. Для правильных измерений вольтметр V_1 должен быть вольтметром средних значений. Однако наклон петли гистерезиса на участке от $+B_r$ до $+B_{max}$ близок к линейному,

вследствие чего для измерений может быть использован вольтметр, предназначенный, в основном, для измерения синусоидальных напряжений, например вольтметр типа МВЛ-2М. Приращение потока $\Delta\Phi$ не зависит от частоты измерения, поскольку релаксационные частоты такого режима намагничивания весьма высоки. В этом можно убедиться путем проверки постоянства величины $\Delta\Phi$ при повышении до частоты, при которой скорость изменения намагничивающего поля от 0 до H_{max} будет примерно такой же, как на фронтах импульсов тока в рабочем режиме сердечника.

Изложенная методика определения наклона пологой части петли гистерезиса является достаточно простой и использует обычную стандартную аппаратуру.

Необходимо, правда, отметить, что при таком методе измеряется некоторое среднее значение приращения потока $\Delta\Phi$ в пределах от 0 до H_{max} , в то время как на самом деле крутизна пологой части петли гистерезиса не является постоянной. В точке $H_{max} = 0$, (т. е. в точке B_r) эта крутизна является наибольшей, поэтому э. д. с. помехи, которая в случае линейно нарастающего тока будет максимальной в точке B_r , может превышать э. д. с. помехи, рассчитанную по среднему значению $\Delta\Phi$. Однако при значениях $H_{max} = (2 \div 5) H_c$ эта разница весьма незначительна и при точности измерений, ограниченной применением обычно измерительной аппаратуры, практически не проявляется.

При выборочных испытаниях определяются импульсные параметры H_0 и S_w . Для этих испытаний отбирается некоторое количество сердечников, предварительно прошедших 100-процентную проверку; по результатам выборочных испытаний оценивается качество всей партии в целом. Параметры S_w и H_0 проверяются как при нормальной темпера-

туре, так и в крайних точках рабочего диапазона температур. Кроме того, в крайних температурных точках проверяются также и отклонения параметров τ , e_c и $\Delta\Phi$ от их значений при комнатной температуре.

Измерение коэффициента перемагничивания S_w и напряженности порогового поля H_0 производится по схеме рис. 6. На испытуемый сердечник наматываются две обмотки, причем намагничивающая обмотка w_1 распределяется равномерно по всему сердечнику, а витки измерительной обмотки w_2 наматываются возможно ближе друг к другу.

Для определения S_w и H_0 измеряются время перемагничивания сердечников τ и амплитудное значение э.д.с. сигнала e_c при нескольких значениях токов перемагничивания I_1 и I_2 . Эти токи могут быть как одинаковыми, так и различными; в частности, один из токов часто поддерживается постоянным. Выбор режима намагничивания определяется режимом работы сердечника в реальных схемах (τ измеряется как обычно на уровне $0,1I_{max}$).

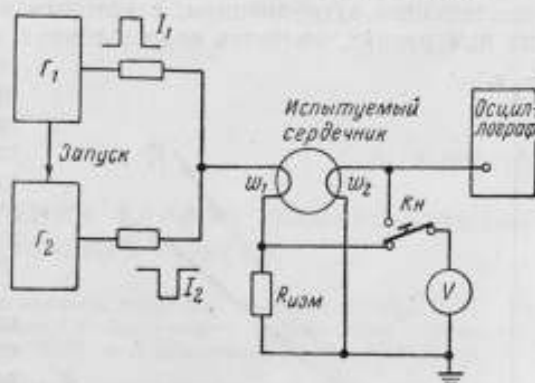


Рис. 6. Схема измерений S_w и H_c .

По результатам измерений в 5—6 точках строится график $\frac{1}{\tau} = f(H)$, по которому определяются значения S_w и H_0 .

Надо отметить, что вследствие погрешностей измерения, а также из-за неточной аппроксимации при построении графика параметры S_w и H_0 определяются с ошибкой. Для уменьшения ошибок дополнительно к графику $\frac{1}{\tau} = f(H)$ строится график $e_c = \varphi(H)$ (рис. 7). Поскольку аппроксимированные прямые должны пересекаться в точке H_0 , построение графика $e_c = \varphi(H)$ позволяет более точно построить прямую $\frac{1}{\tau} = f(H)$.

Аналогично проводятся и измерения S_w и H_0 в крайних точках температурного диапазона, для чего сердечники помещаются в термостат. Перед началом испытаний сердечники выдерживают в камере при температуре испытаний не менее 1 ч.

Одновременно с измерением S_w и H_0 при крайних температурах проводятся измерения e_c и τ (в той же схеме рис. 6), а также $\Delta\Phi$ (по схеме рис. 5). Только при условии, что сердечники, отобранные из всей партии для выборочных испытаний, удовлетворяют предъявленным требованиям по температурной стабильности параметров, вся партия ферритовых сердечников считается выдержавшей испытания и пригодной к применению в элементах.

Помимо перечисленных выше измерений, при выборочных испытаниях проверяются также размеры отобранных сердечников: наружный и внутренний диаметры и высота. Статические характеристики петли гистерезиса на постоянном токе проверяются лишь при периодических (типовых) испытаниях, проводимых значительно реже (один раз в квартал или полугодие). В основном периодические испытания прово-

дятся с целью контроля материала сердечника, а также проверки устойчивости технологического процесса.

При недостаточной отработке технологического процесса проверку статических характеристик сердечников целесообразно отнести не к типовым, а к выборочным испытаниям. Периодические испытания проводятся на сердечниках, предварительно прошедших 100-процентные и выборочные испытания.

Методика баллистических измерений параметров статической петли гистерезиса является общезвестной. Необходимо только отметить, что существенным затруднением, с которым приходится сталкиваться при этих измерениях, является недостаточная чувствительность баллистических гальванометров. Поэтому приходится, как правило, контроль параметров статической

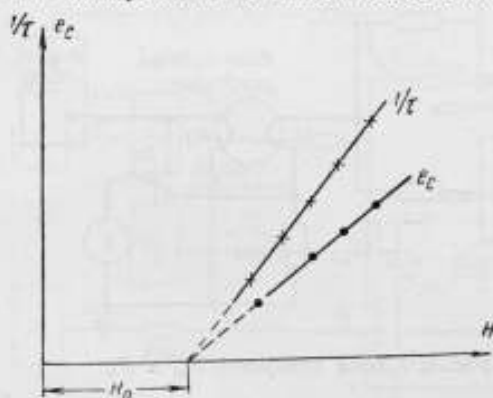


Рис. 7. Зависимость $\frac{1}{\epsilon}$ и ϵ_c от напряженности поля (к определению S_w и H_0).

петли гистерезиса производить на гирляндах из 20—30 сердечников, что дает возможность получать лишь усредненные данные.

Применение метода осциллографирования петли гистерезиса вряд ли целесообразно ввиду низкой точности, а также сложности измерительной аппаратуры.

При проведении выборочных и периодических испытаний приходится решать вопрос о выборе необходимого количества сердечников, по результатам испытаний которых оценивается затем качество всей партии ферритовых сердечников в целом. В практике испытаний радиодеталей часто применяется следующая схема контроля, которая может быть перенесена и на контроль ферритовых сердечников. Пусть проверяется n сердечников из общего количества N ; если все n сердечников выдерживают испытания, то партия считается годной, практически не имеющей брака. Если в проверяемой партии оказывается $m_1 > C_1$ некондиционных сердечников, то от партии вновь проверяется еще $2n$ сердечников; при этом, если среди $2n$ сердечников окажется $m_2 > C_2$ некондиционных, то вся партия сердечников бракуется; в противном случае — признается годной.

Выбор величины партии N , объема выборки n и допустимого количества бракованных сердечников в партии $m \leq C$ (можно задавать также $C=0$) должен производиться в каждом конкретном случае в зависимости от степени разработанности и устойчивости технологического процесса изготовления сердечников, с учетом допустимого процента брака на последующих стадиях производства элементов и аппаратуры на них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поливзанов К. М., Доклады АН СССР, т. 11, № 1, 1958.
2. Chen T. C., Paroulis A., Proc. IRE, v. 46, N 5, part 1, 1958, p. 839.
3. Шамаев Ю. М., Дятлов В. Л., Пирогов А. И., Научные доклады высшей школы. «Электромеханика и автоматика», № 1, 1959; сб. «Ферриты», Минск, 1960.
4. Lindsey C. H., Proc. IEE, v. 106, part C., N 10, 1959, p. 117.
5. Menyik N., Goudinaf K., Journ. Appl. Phys., v. 26, N 1, 1955, p. 8.
6. Shevel W. L., Journ. Appl. Phys., v. 30, N 4, 1959 p. 47.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ В ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМЕ

В статье дается анализ погрешностей установки, применяемой для определения кривой намагничивания в импульсном режиме при частоте повторения импульсов от 50 до 5000 гц и длительности 0,1-2000 мксек.

В многочисленных устройствах, применяемых в автоматике и ряде других областей новой техники, широко применяются магнитные материалы, работающие в импульсном режиме. Эти материалы по своим свойствам можно разбить на две группы. В первую входят те, у которых отношение остаточной индукции к индукции насыщения близко к единице; у второй группы эта величина должна быть как можно меньше. Разумеется, указанный признак еще не определяет пригодность того или иного материала для заданного устройства, так как имеется еще целый ряд требований, налагаемых специфическими особенностями импульсных процессов.

Однако принадлежность материала к той или иной группе предопределяет выбор аппаратуры, необходимой для его испытаний в импульсном режиме. Ниже приводятся данные по результатам разработки и исследования установки, применяемой для определения проницаемости материалов второй группы при частоте повторения импульсов от 50 до 5000 гц и длительности 0,1-2000 мксек.

Блок-схема установки приведена на рис. 1. Импульсное напряжение, поступающее с выхода источника питания, подается на последовательно соединенные первичную обмотку испытуемого образца и небольшое сопротивление r_1 . Наибольшее значение падения напряжения U_{max} на нем позволяет определить амплитуду напряженности магнитного поля:

$$H_{max} = \frac{U_{max}}{r_1} \frac{w_1}{l}, \quad (1)$$

где w_1 — число витков намагничивающей обмотки;
 l — длина магнитного пути.

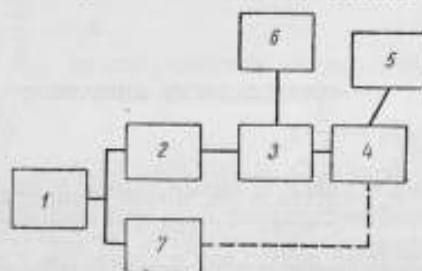


Рис. 1. Блок-схема установки:

1 — генератор; 2 — усилитель мощности; 3 — измерительное устройство; 4 — усилитель компаратора; 5 — индикаторное устройство; 6 — осциллограф; 7 — калибратор импульсов.

Схема источника питания и параметры измерительной цепи выбираются такими, чтобы перед началом очередного импульса сила тока, протекающая по первичной обмотке, была бы ничтожно малой.

Для измерения максимального прироста индукции ΔB в схеме используется интегрирующая rC -цепь, которая может подключаться как непосредственно к источнику питания, так и ко вторичной обмотке образца. Если $\omega_1 = \omega_2$, то индуктивность

$$L = r_1 r_2 C \cdot \frac{U_c}{U_r} \quad (2)$$

Однако в обоих случаях приходится учитывать дополнительную погрешность, зависящую от способа включения. В первом случае падение напряжения на интегрирующей цепи будет зависеть не только от скорости изменения потока индукции, но и от полного сопротивления в намагничивающей цепи. Во втором случае возникает погрешность, обусловленная размагничивающим действием тока, протекающего по интегрирующей цепи. Количественно эта погрешность может быть оценена из соотношения:

$$i_1 \omega_1 = i_0 \omega_1 + i_c \omega_2, \quad (3)$$

где i_1 и i_c — величины сил токов, протекающих по обмоткам ω_1 и ω_2 при наибольшем значении i_0 .

Измерения проводились, как правило, при подключении интегрирующей цепи к выходу генератора. Для того чтобы исключить упомянутую систематическую погрешность в обработке результатов измерения при прямоугольной форме напряжения вводилась поправка, определяемая формулой

$$\Delta_1 = \frac{\tau}{2} \left(\frac{1}{\theta_L} - \frac{1}{\theta_C} \right), \quad (4)$$

где τ — длительность импульса;

$$\theta_L = \frac{L}{r_n};$$

$$\theta_C = r_2 C;$$

r_n — полное активное сопротивление, включенное последовательно с испытуемой индуктивностью.

Сходный результат получается для режима «прямоугольного тока».

Поправка Δ_1 учитывает также неточность интегрирования с помощью rC -цепи.

Использование формулы (4) позволяет получить требуемый результат более простым путем по сравнению с методикой, описанной в [1].

Кроме приведенных факторов, на точность измерения оказывают существенное влияние следующие факторы:

1) собственная емкость C_n намагничивающей обмотки испытуемого образца;

2) постоянные времени сопротивлений r_1 и r_2 ;

3) действие распределенных параметров у испытуемого образца и конденсатора при измерениях в области коротких импульсов;

4) погрешность определения амплитуды импульсного напряжения.

Следует отметить, что при правильном выборе провода, используемого при намотке сопротивлений r_1 и r_2 , действием вихревых токов, как показывает расчет, можно пренебречь.

Большое влияние на условия испытаний может оказать емкость C_n монтажа. Расчет в полном соответствии с опытом показывает, что при

большой величине произведения LC_n возникают высокочастотные колебания, накладываемые на основной импульс, которые резко изменяют процесс намагничивания.

Наличие этой емкости так же, как и действие первого из упомянутых факторов, влечет за собой необходимость проведения испытания при малой длительности импульсов на образцах с небольшим числом витков, так как при заданных условиях можно указать наибольшую величину индуктивности, при которой высокочастотные колебания еще отсутствуют. Так, при наиболее неблагоприятных условиях дополнительная δ_{C_n} погрешность, вызванная протеканием тока через C_n , может быть записана в виде

$$\delta_{C_n} = \frac{A}{\tau}, \quad (5)$$

где A — константа, зависящая от параметров схемы.

Задавая допустимую величину дополнительной погрешности δ_{C_n} при известной емкости C_n и длительности импульса, можно определить наибольшее значение индуктивности L .

Влияние постоянных времени θ_{r_1} и θ_{r_2} на результат определения индуктивности вызвано тем, что падения напряжения на конденсаторе C и сопротивлении r_1 зависят от этих величин, что приводит к появлению дополнительных погрешностей. Как правило, величина сопротивления r_1 не превышает 10—15 ом, так что решающее значение имеет его индуктивность L_{r_1} . Если считать, что $\theta_{r_1} = \frac{L_{r_1}}{r_1}$, то, как показывают расчеты, дополнительная погрешность, вызванная этой причиной, может быть найдена из выражения:

$$\delta_{\theta_{r_1}} = -\frac{\theta_{r_1}}{\tau}. \quad (6)$$

Что касается постоянной времени θ_{r_2} , то погрешность интегрирования, вызванная ее влиянием, может быть оценена из выражения:

$$\delta_{\theta_{r_2}} = \frac{\theta_{r_2}}{\tau}. \quad (7)$$

Влияние распределенных параметров у испытуемого образца и конденсатора интегрирующей цепи обусловлено тем, что переходный процесс в таких устройствах имеет, как известно [2], ступенчатый, скачкообразный характер. Между тем расчетное соотношение (2), определяющее взаимосвязь между индуктивностью и измеренными величинами, основано на предположении о плавном характере изменения их во времени. Для иллюстрации получаемых соотношений на рис. 2 приведены кривые, показывающие изменение напряжения на конденсаторе интегрирующей цепи, причем одна из них учитывает влияние распределенных параметров, а вторая построена в предположении, что конденсатор можно рассматривать как сосредоточенную емкость, когда

$$U_C(t) = U_0 \frac{t}{r_2 C}, \quad (8)$$

где U_0 — напряжение на выходе генератора (предполагается, что измерения производятся в режиме, когда поток индукции линейно возрастает во времени).

Нетрудно установить, что погрешность δ_p , связанная с учетом влияния распределенных параметров, может быть записана следующим образом:

$$\delta_p = \frac{\tau_A}{\tau}, \quad (9)$$

где τ_A — время задержки сигнала линией.

Приведенные соотношения позволяют выбрать параметры схемы таким образом, чтобы общая погрешность, обусловленная перечисленными факторами, не превосходила 2—3%.

Весьма важной частью устройства является прибор для определения амплитудного значения напряжения. Промышленные образцы импульсных вольтметров мало пригодны для этого устройства, так как

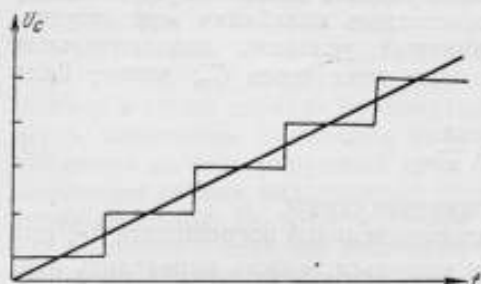


Рис. 2. Изменение напряжения на конденсаторе интегрирующей цепи во времени.

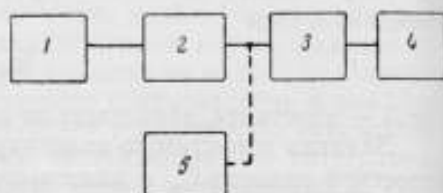


Рис. 3. Блок-схема устройства для измерения амплитуды импульсного напряжения:

1 — генератор пусковых импульсов; 2 — усилитель, формирующий калиброванные импульсы; 3 — усилитель компаратора; 4 — индикаторное устройство; 5 — источник измеряемого напряжения.

имеют низкий класс точности (обычно 4) и мало пригодны для определения амплитуды напряжения величиной от нескольких десятых долей вольта до 10 в при длительности импульсов 0,1—2000 мксек. Наиболее подходящими для этой цели были бы вольтметры компенсационного типа [3], однако они не позволяют проводить измерения с высокой точностью при амплитуде меньше чем 2—3 в.

В разработанной установке применяется прибор, действие которого основано на сравнении измеряемого напряжения с известным. Блок-схема прибора приведена на рис. 3. Величина известного напряжения, получаемого от усилителя, работающего в режиме ограничения, подбирается таким образом, чтобы показания индикатора совпадали с величиной, найденной при подключении входа компаратора к измеряемому напряжению. Таким образом, измерение амплитуды напряжения сводится к поочередному подключению индикаторного устройства к исследуемому объекту и источнику калиброванных импульсов.

Индикаторная часть прибора состоит из широкополосного усилителя и импульсного вольтметра обычного типа. Благодаря тому, что последний используется лишь как индикатор, его погрешности слабо сказываются на результатах измерения. При правильном выборе рабочей полосы частот усилителя погрешность прибора будет определяться в основном особенностями калибратора импульсов, схема которого дана на рис. 4. Параметры, приведенные на этом рисунке, позволяют исполь-

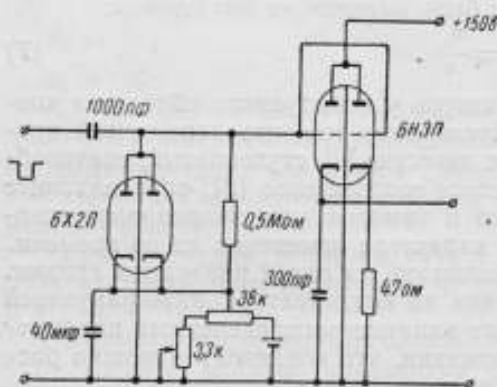


Рис. 4. Схема усилителя, предназначенного для получения «калиброванных» импульсов.

зовать этот прибор при длительности импульсов 0,2÷20 мксек. Для измерений в области более коротких импульсов целесообразно использовать лампу 6С1Ж вместо 6НЗП. Методика работы с устройством весьма проста. До подключения его к источнику закрывающих импульсов отрицательной полярности определяется падение напряжения на сопротивлении, включенном в цепь катода, с помощью прибора постоянного тока достаточно высокой точности, не потребляющего сколько-нибудь заметного тока (потенциометра, вольтметра с очень большим сопротивлением). При появлении на входе импульсов отрицательной полярности лампа закрывается, что вызовет перепад напряжения на катодном сопротивлении.

Основные факторы, определяющие погрешность воспроизведения калибратором импульсов отрицательной полярности, связаны с действием разделительного конденсатора в цепи сетки, емкостью участка сетка—катод и постоянной времени катодной цепи.

Влияние разделительного конденсатора в цепи сетки обусловлено тем, что по окончании импульса он оказывается заряженным, причем из-за большой постоянной времени сеточной цепи разряд его не заканчивается полностью к началу следующего импульса, поэтому сила тока, протекающего по катодному сопротивлению перед началом очередного импульса оказывается отличной от величины, полученной при отсутствии сигнала на входе. Для снижения влияния этой погрешности на результаты измерения используется диод 6Х2П.

Расчет этой погрешности приводит к следующему соотношению:

$$\delta_2 = \frac{U_1}{U_{\text{вых}}} \frac{\left(1 - e^{-\frac{\tau}{\theta_1}}\right) e^{-\frac{\tau}{\theta_2}}}{1 - e^{-\frac{\tau}{\theta_2}}} q, \quad (10)$$

где U_1 — амплитуда пускового напряжения;

$U_{\text{вых}}$ — величина выходного напряжения;

θ_1 и θ_2 — постоянные времени сеточной цепи при закрытом и открытом диоде;

q — коэффициент усиления по напряжению катодного повторителя.

При указанных на рис. 4 параметрах и скважности не менее 50 эта погрешность не превосходит 0,2% для импульсов длительностью 0,2÷20 мксек. Аналогичным образом можно подобрать параметры и для других значений длительности импульсов.

Влияние емкости сетка—катод приводит к тому, что появляется возможность протекания по катодному сопротивлению тока, связанного с пусковым отрицательным импульсом. Ввиду того, что величина пускового импульсного напряжения, как правило, много больше, чем падение напряжения на сопротивлении в цепи катода, действием этого фактора пренебрегать нельзя. Расчет показывает, что погрешность, вызванная этим фактором, а также постоянной времени катодной цепи, может быть оценена из выражения

$$\delta_3 = \begin{cases} \frac{-|U_1|\lambda + |U_{\text{вых}}|}{|U_{\text{вых}}|}, & \text{если } \frac{|U_1|\lambda}{|U_{\text{вых}}|} > 1 \\ \frac{|U_{\text{вых}}| - \lambda |U_1|}{U_{\text{вых}}} e^{-\frac{\tau}{\theta_1}}, & \text{если } \frac{|U_1|\lambda}{|U_{\text{вых}}|} \leq 1, \end{cases} \quad (11)$$

где $\lambda = \frac{C_{\text{ск}}}{C}$;

$C_{\text{ск}}$ — емкость лампы;

C' — емкость конденсатора, шунтирующего катодное сопротивление;

$$\theta'_1 = r_k C'$$

Таким образом, для уменьшения этой погрешности следует выбрать емкость, шунтирующую сопротивление катода, однако при этом должны быть удовлетворены неравенства (6) и (7) $\theta'_1 \ll \tau_{\min}$

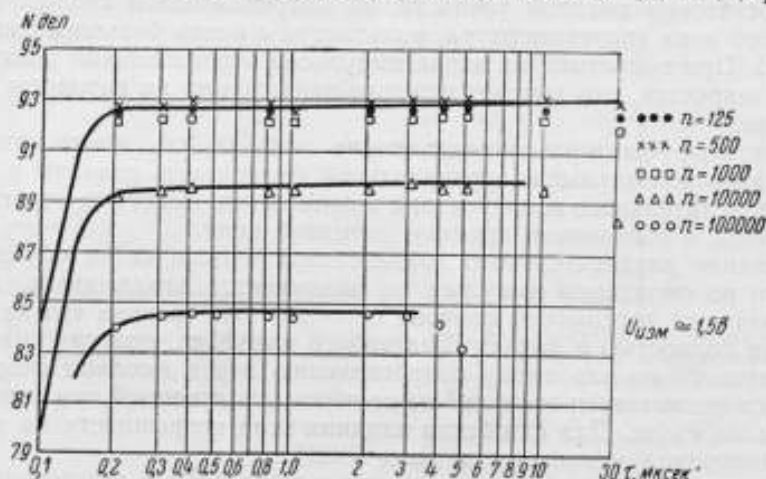


Рис. 5. Зависимость показаний индикаторного устройства от длительности и скважности импульсов:
 ... — $n=125$; $\times\times\times\times$ — $n=500$; $\square\square\square$ — $n=1000$; $\triangle\triangle\triangle$ — $n=10000$;
 $\circ\circ\circ\circ\circ$ — $n=100000$.

где τ_{\min} — наименьшая длительность импульса. На рис. 5 приведены результаты определения показаний N индикаторного устройства для разных значений длительности импульсов τ и скважности n .

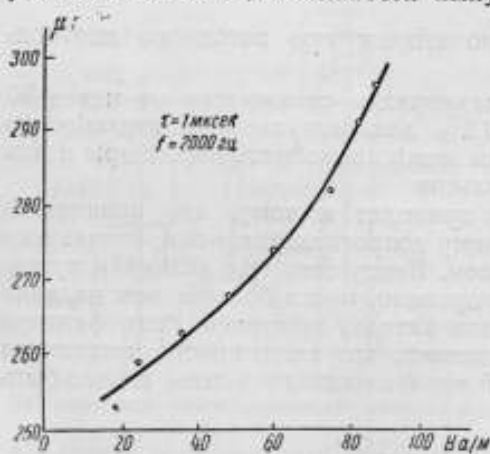


Рис. 6. Зависимость проницаемости образцов феррита марки НЦ-600 от напряженности магнитного поля.

тами показало, что погрешность измерения напряжения не превышает 2%, а погрешность определения кривой намагничивания составляет 5—7%.

«Завал» в области коротких импульсов объясняется недостаточной полосой пропускания использованного усилителя. Указанное обстоятельство не имеет существенного значения, так как усилитель применяется в компарирующей части устройства. Этот недостаток может быть легко устранен применением усилителей с распределенными параметрами (например УР-4). Зависимость показаний прибора от скважности объясняется погрешностями индикаторного устройства, которые в данном случае не имеют большого значения.

Экспериментальное исследование прибора в полном соответствии с теоретическими результатами

На рис. 6 приведены результаты измерения относительной проницаемости у образца, изготовленного из феррита марки НЦ-600. Как и следовало ожидать [4], при длительности импульсов, равной 1 мксек, проницаемость оказывается близкой к получаемой при измерениях баллистическим методом на постоянном токе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mellvill, PIRE, v. 97, N 56, 1950, p. 165.
2. Круг К. А., Основы электротехники, ГОНТИ, 1938.
3. Момот Е. Г., Радиотехнические измерения, Госэнергоиздат, 1957.
4. Поливанов К. М., Ферромагнетики, Госэнергоиздат, 1957.

Ю. И. ВИЗУН

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

В статье дается описание импульсной аппаратуры, применяемой в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР как для исследования физических свойств ферритовых сердечников, так и проверочных испытаний их.

Миниатюрные высокочастотные магнитные сердечники, главным образом ферритовые тороидальной формы с прямоугольной петлей гистерезиса, применяются в очень больших количествах. С этой точки зрения, основным, несомненно, является случай их применения в оперативных запоминающих устройствах быстродействующих вычислительных машин (МОЗУ), где они практически полностью вытеснили все другие типы запоминающих элементов. Необходимо также отметить, что наряду с МОЗУ такие сердечники довольно широко применяются для построения магнитных дешифраторов, коммутаторов, распределителей импульсов и логических схем для всевозможных устройств автоматики, телемеханики и вычислительной техники.

То обстоятельство, что наиболее распространенным случаем их применения, к тому же и более ранним по времени, явился именно случай применения сердечников для построения МОЗУ, наложило свой определенный отпечаток на выработку системы характеристик этих сердечников, технических условий на них, методику их испытаний, а следовательно, и испытательную аппаратуру.

В настоящее время различными организациями, занимающимися применением таких сердечников, создано большое количество образцов специальной испытательной аппаратуры и выработаны частные методики испытаний. Несмотря на ряд различий, эта аппаратура и эти методики имеют много общих черт, главными из которых являются, во-первых, принцип проверки основных свойств сердечника в импульсном режиме и, во-вторых, определение некоторых заранее выбранных величин, характеризующих работу сердечника в конкретной схеме, и относительная оценка этих величин по установленным критериям.

Этот вид испытаний, несомненно, весьма важный для практики, не может, очевидно, быть единственным и безусловно должен сочетаться с другими видами.

Суть дела заключается в том, что магнитный сердечник, как и любой физический прибор, должен подвергаться всестороннему исследованию так же, как, например, это имеет место в случае транзисторов, электронных ламп и целого ряда других деталей.

В результате такого исследования сердечника необходимо составить полное представление о его поведении в разных, и подчас, резко различных условиях, о его собственных физических параметрах и характеристиках. Далее, располагая этими знаниями, можно решать широкий круг вопросов, связанных с областями применения сердечников, конкретными рабочими схемами, в которых они могут работать, способами наиболее полного использования того или иного полезного качества сердечника, а также эффективной борьбы с недостатками. Точно так же сознательное управление технологическим процессом производства сердечников и разработка новых марок ферритов немыслимы без всестороннего исследования свойств сердечников.

С другой стороны, тот тип проверочных испытаний, о котором говорилось выше, также необходим и достаточен в ряде случаев (например, при проверке свойств сердечников, изготовленных для какого-либо конкретного устройства), если проверочная аппаратура и методика измерений выработаны на основе более глубоких и всесторонних исследований.

Таким образом, можно утверждать, что при работе с магнитными сердечниками необходимы два вида их испытаний. Первым видом надо считать исследование физических свойств самих сердечников, имеющее целью определение их собственных характеристик, а вторым — проверочные испытания, служащие для определения значений некоторых важных параметров в выбранных точках характеристик или, что чаще, для определения отклонения этих параметров от выбранных заранее значений.

Требования простоты и надежности аппаратуры, наряду с чисто экономическими соображениями по времени испытаний и ее стоимости, приводят к тому, что применительно к каждому виду испытаний должна быть создана своя аппаратура и свои методики.

Рассмотрим в качестве примера случай измерения времени переходного процесса в сердечнике — времени перемагничивания.

В настоящее время известно, что это время зависит от амплитуды действующего поля, температуры сердечника, его материала, геометрии и некоторых других причин. Тем не менее, в первом приближении можно считать, что для сердечников, изготовленных из одного и того же материала, имеющих одинаковые размеры и перемагничиваемых в одних и тех же условиях равными полями, это время примерно одинаково. Поэтому, например, часто при отборе сердечников для какого-либо конкретного устройства этот параметр вообще не контролируют. Такая практика сама по себе может послужить причиной отказа или снизить надежность устройства, так как часто наблюдаются отклонения от этого правила. Так, на практике наблюдаются некоторые расхождения не только в длительности самого переходного процесса, но и в структуре сигнала перемагничивания, что указывает на различие в процессе перемагничивания у одних сердечников по сравнению с другими. Этого нельзя не учитывать особенно в случае применения больших количеств сердечников в одном устройстве.

Между тем исследование времени переходного процесса не может быть проведено на обычной поверочной аппаратуре, так как обычно в такой аппаратуре используются импульсы с постоянной и сравнительно небольшой скоростью нарастания тока, то практически характе-

ристика времени перемангничивания самого сердечника может быть снята лишь в очень небольших пределах.

В достаточных для практики пределах такая характеристика может быть снята с нужной достоверностью лишь на специальном исследовательском приборе, который обеспечивает отсутствие «аппаратурного эффекта», т. е. влияния параметров самого прибора на снимаемую характеристику.

Так, например, для того чтобы характеристика времени перемангничивания в функции от действующего поля отражала только свойства самого сердечника, надо, чтобы время нарастания поля до конечной величины, к которой, собственно, и привязывается данное время перемангничивания, было пренебрежимо мало по сравнению с самим переходным процессом.

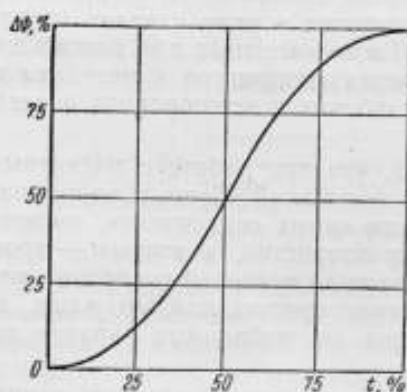


Рис. 1. График изменения потока в сердечнике.

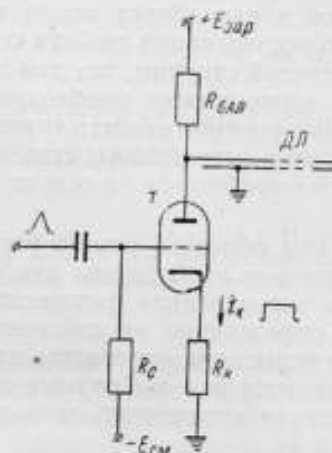


Рис. 2. Принципиальная схема формирователя.

На рис. 1 представлен график изменения потока в сердечнике в функции от времени в относительных единицах. При конечном значении скорости нарастания тока в импульсе неизбежно какая-то часть полного изменения потока произойдет за время нарастания тока в импульсе, т. е. за время его переднего фронта. Именно за счет того, что эта часть потока меняется не в постоянном поле, к которому мы привязываем данное измерение, а в меньшем по величине и изменяющемся во времени поле, в наших измерениях появится погрешность, величина которой будет зависеть от того, какая часть магнитного потока сердечника успела измениться за время нарастания тока. Если задаться определенной допустимой погрешностью измерений, то, пользуясь графиком рис. 1, можно определить крутизну фронта импульса тока, необходимую для снятия характеристики времени перемангничивания в определенном диапазоне времен с нужной точностью.

Для большинства распространенных ферритовых сердечников, например, оказывается, что для того, чтобы сравнительно точно изучать переходные процессы в диапазоне от 200 нсек и выше, необходим импульс тока с фронтом порядка 20 нсек. Импульсы тока с таким фронтом и амплитудой до нескольких ампер хорошо формируются на искусственных длинных линиях, разряжаемых на сопротивление, равное волновому, с помощью тиратронов. Принципиальная схема такого формирователя изображена на рис. 2.

В Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР этот принцип формирования был впервые применен для исследования переходных процессов в магнитных сердечниках в 1956 г., а с начала 1957 г. построены и успешно применяются приборы Т-1, предназначенные для этой цели.

На рис. 3 представлена блок-схема (а) и временная диаграмма (б) работы этого прибора. Как видно из этого рисунка, в приборе работают два одинаковых формирователя импульсов тока, состоящих каждый из тиратронного генератора $ТГ$, построенного по схеме рис. 2, и усилителя тока $УТ$ на лучевых тетрадах. Блокинг-генераторы $Б_0$ и $Б_1$ используются в качестве задающего и запускают один тиратронный генератор непо-

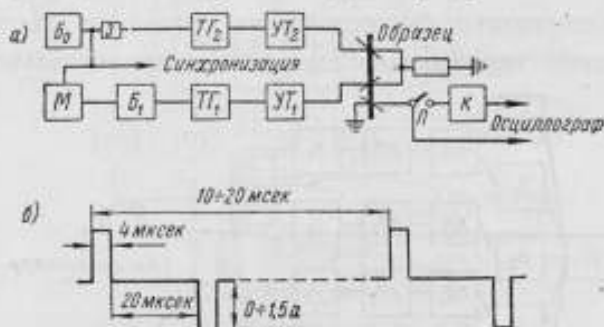


Рис. 3. Блок-схема прибора Т-1 и временная диаграмма его работы.

средственно, а другой — через задержку M . Сигнал со считывающей обмотки исследуемого сердечника подается на вход осциллографа либо прямо, либо через катодный повторитель K . Оба импульса тока имеют одинаковую полярность, и поэтому для получения программы, изображенной на рис. 3, применяется встречное включение обмоток на испытуемом образце.

Такой прибор оказался весьма надежным и удобным для изучения переходных процессов в ферритовых сердечниках с наружным диаметром до 3 мм; при этом характеристика вида $\frac{1}{\tau} = f(H)$ может быть снята до значений порядка $6 \div 8 \text{ мксек}^{-1}$.

Прибор Т-1 можно считать примером узко специализированного исследовательского прибора, предназначенного для снятия характеристик времени перемангничивания сердечников вида $\tau = f(H)$ или характеристик быстродействия вида $\frac{1}{\tau} = f'(H)$ в сравнительно широком диапазоне и с приемлемой точностью. Этот прибор не предназначен для контроля свойств сердечников, в частности, для контроля времени их перемангничивания, и такое его использование было бы нецелесообразным.

С другой стороны, в настоящее время применяются приборы для импульсной проверки свойств сердечников, которые, наряду с операциями контроля свойств сердечников, допускают также и снятие характеристик в некотором диапазоне с достаточной точностью.

Примером такого комбинированного прибора может служить так называемый стенд С-1. Этот прибор был разработан в Институте также в 1956—1957 гг., прежде всего для целей отбора сердечников по определенным параметрам, но одновременно использовался и используется по настоящее время в качестве простого исследовательского прибора для

снятия различных характеристик сердечников. На рис. 4 представлена блок-схема этого прибора. В отличие от прибора Т-1 стенд С-1 имеет трансформаторный выход, что позволяет производить все измерения с помощью единственной одновитковой обмотки и делает этот прибор пригодным для отбора сердечников. С другой стороны, возможность регулирования параметров отдельных импульсов тока, вплоть до их выключения, позволяет составлять различные программы и снимать некоторые характеристики. Импульсы в этом приборе генерируются по четырем отдельным каналам и имеют следующие параметры: амплитуда до 2 а при длительности фронта 0,25—0,3 мксек; длительность импульса до 20 мксек. При таких параметрах импульсов на стенде С-1 можно снимать характеристики быстродействия только до значений $\frac{1}{\tau} \approx 1$, а характеристики, выявляющие импульсную прямоугольность и квад-

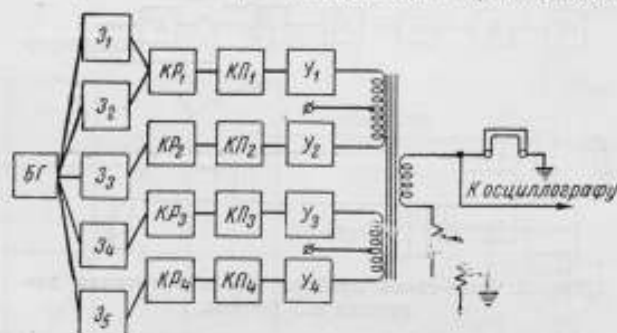


Рис. 4. Блок-схема стенда С-1.

БГ — блокинг-генератор; З, З₂ — блоки задержек; КР, КР₂ — реле; У, У₂ — усилитель тока; КП, КП₂ — катушки повторителя.

ратность петли гистерезиса, в несколько более широких пределах. Однако строго говоря, все данные, полученные с помощью этого прибора для режимов, характеризующихся быстродействием порядка 1 мксек^{-1} и выше, не являются «чистыми» характеристиками сердечника и поэтому сопровождаются оговоркой о типе аппаратуры, на которой они получены.

Для исследования сердечников и снятия различных характеристик с них в более широких пределах целесообразно использовать прибор, который имеет достаточно гибкую программу, составленную из нескольких независимо регулируемых импульсов с хорошими параметрами.

Одним из возможных путей построения такого прибора является использование принципа формирования импульсов тока на длинных линиях, как в приборе Т-1, но имеющего более развитую программную часть, аналогичную примененной в стенде С-1. Прибор этого типа был разработан и построен в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР в 1958—1959 гг. и получил название С-2.

На рис. 5 представлена его блок-схема. Здесь M_1 — задающий мультивибратор; $У_1—У_4$ — дифференцирующие усилители; $Б_1—Б_4$ и т. д. — блокинг-генераторы; $M_2—M_6$ — мультивибраторы задержки импульсов запуска; $ТГ_1—ТГ_4$ — тиратронные генераторы; $ТП$ — тиратронный повторитель; $П_1$ — переключатель.

Как видно из приведенной блок-схемы, в приборе имеются четыре одинаковых независимых канала формирования импульсов тока, три из которых могут автономно выключаться, а один — работать с одинарной, двойной или тройной частотой по сравнению с остальными.

Такая схема построения прибора позволила получить импульсы тока в каналах со следующими параметрами: амплитуда — до 5 а, длительность — до 4,5 мксек, крутизна переднего фронта — от 70 до 10 нсек. Импульсы не имеют выбросов обеих полярностей и заметного спада плоской части. Бестрансформаторный способ включения ис-

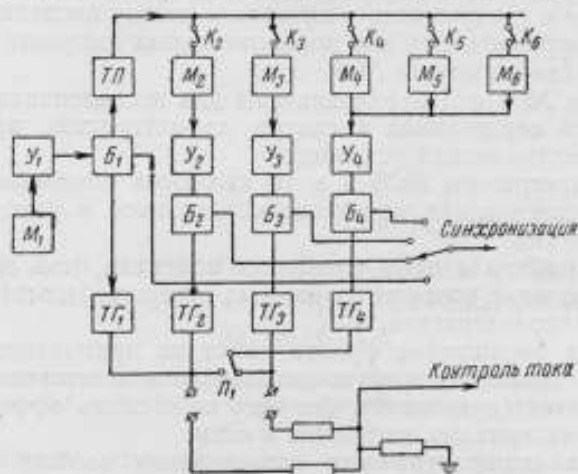


Рис. 5. Блок-схема прибора С-2.

следуемого сердечника в схему прибора предполагает наличие одной или двух первичных одновитковых обмоток и отдельной выходной обмотки (также одновитковой), что допустимо для исследовательского прибора и было бы очень неудобно для проверочного

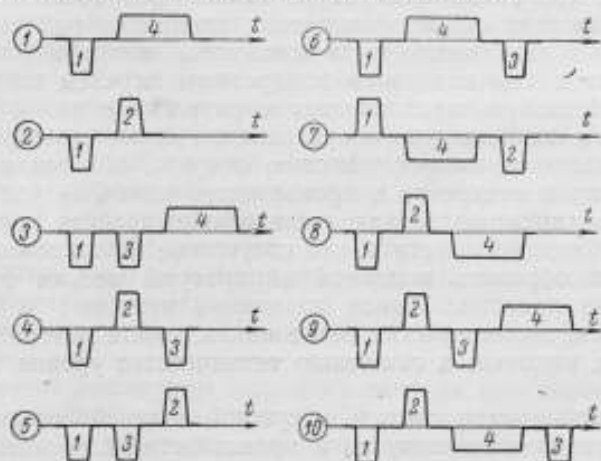


Рис. 6. Последовательность импульсов программ прибора С-2.

При работе с прибором можно использовать одну из 10 программ, т. е. последовательностей импульсов тока, изображенных на рис. 6. Цифры на импульсах тока соответствуют номерам тиратронных генераторов на блок-схеме (рис. 5), которые вырабатывают эти импульсы.

Первые три последовательности удобны для снятия характеристик времени перемagnetизации сердечника для значений τ в диапазоне от 4,5 мксек до 50 нсек. Эти же программы могут быть рекомендованы

для снятия характеристик «разрушения состояния», т. е. для исследования квадратности петли гистерезиса. Для этой же цели удобно применять программы № 6, 7 и 8, причем программы № 6 и 8 предназначены для исследования более медленных процессов, связанных с разрушением, при дополнении их еще двумя импульсами, не показанными на этом рисунке и следующими в интервале между последним и первым импульсами программы. Эти два дополнительных импульса имеют такие же параметры, как и импульс № 4.

Программы № 4 и 5 предназначены для исследования импульсной прямоугольности сердечников и снятия характеристик применительно к условиям переключающих устройств.

Наконец, программы №№ 9 и 10 являются обзорными и предназначены для исследования поведения сердечников в условиях запоминающего устройства.

Практика работы с этим прибором показала, что он достаточно удобен и позволяет с хорошей точностью снимать большое количество разнообразных характеристик.

Дальнейшее расширение фронта работ по применению магнитных сердечников настоятельно требует детального и всестороннего исследования свойств этих сердечников, без чего немыслима эффективная разработка новых материалов, элементов и схем.

Импульсная аппаратура для исследования свойств сердечников, равно как и аппаратура для их контроля и проверки, несомненно, должна постоянно совершенствоваться, причем разработка новой и усовершенствование имеющейся аппаратуры для исследований является в настоящее время не менее, а может быть даже и более важной задачей, чем конструирование поверочной аппаратуры и приборов контроля свойств сердечников.

Тот факт, что такая аппаратура может разрабатываться только на основе понимания общих физических принципов работы магнитных сердечников без детального учета множества специфических требований, связанных с тем или иным конкретным случаем их применения, должен способствовать привлечению к разработке такой аппаратуры широкого круга специалистов и организации совместных работ.

Такая постановка вопроса, в свою очередь, облегчила бы скорейшую разработку и внедрение в производство наиболее удачных образцов импульсной аппаратуры для исследования свойств магнитных сердечников. Необходимо отметить, что отсутствие до настоящего времени промышленных образцов подобной аппаратуры весьма отрицательно сказывается на практике. Такое положение приводит к множественности критериев, характеристик сердечников, марок материала и образцов изделий и, наконец, к снижению технического уровня многих разработок.

Следовательно, надо считать насущной задачей сегодняшнего дня всемерное форсирование выпуска в производственном масштабе испытательной аппаратуры для магнитных сердечников.

В. Г. МИХАЛЕВ, Л. Л. МОХЕЛЬ

ПРИБОР ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

В статье приводится описание установки, предназначенной для определения импульсных параметров ленточных сердечников с толщиной проката от 3 до 10 мк.

В устройствах вычислительной техники и управляющей аппаратуры широко используются ленточные сердечники с петлей гистерезиса прямоугольной формы из ленты сверхтонкого проката толщиной от 3 до 10 мк, называемые микронными сердечниками [1].

Микронные сердечники главным образом используются в переключающих устройствах: логических элементах, дешифраторах, регистрах сдвига, триггерных схемах, счетчиках и т. п.

Использование ленточных сердечников вместо ферритовых в таких устройствах дает значительные преимущества как в отношении надежности работы этих элементов, так и в повышении их быстродействия.

Надежность работы элементов обеспечивается высокой температурной стабильностью сердечников — постоянством магнитных свойств в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды, а высокое значение допустимой частоты перемагничивания позволяет применять их в устройствах, работающих на более высоких частотах, чем ферритовые сердечники. Магнитные свойства микронных сердечников также лучше, чем ферритовых.

Важнейшими импульсными характеристиками сердечников, работающих в этих схемах, являются:

1) зависимость величины выходного сигнала от напряженности приложенного магнитного поля в импульсе;

2) отношение амплитуды полезного сигнала при перемагничивании сердечника по полной петле гистерезиса к амплитуде сигнала помехи, появляющемуся как результат изменения магнитного состояния сердечника в зоне насыщения в зависимости от величины приложенного магнитного поля;

3) зависимость времени перемагничивания сердечника от напряженности приложенного магнитного поля в импульсе.

Исследовались ленточные сердечники из сплавов марок: 79НМ с толщиной ленты 2, 3, 5 мк; 79НМА с толщиной ленты 3, 5 мк; 34НКМП и 50НП с толщиной ленты 5 и 10 мк.

Указанные сплавы разработаны Институтом прецизионных сплавов ЦНИИЧМ.

Статические параметры микронных сердечников из указанных марок и толщин ленты лежат в очень широких пределах как по величине

коэрцитивной силы, так и по остаточной магнитной индукции (коэрцитивная сила H_c меняется в пределах $0,06 \div 0,6$ э, остаточная магнитная индукция B_r — от $6000 \div 15\,000$ гс).

Геометрические параметры сердечников также значительно разнятся: средний диаметр d_{cp} лежит в пределах $0,2 \div 1$ см, высота h — $1,25 \div 15$ мм, число витков ленты n — $10 \div 150$ витков, толщина ленты Δ — $2 \div 10$ мк.

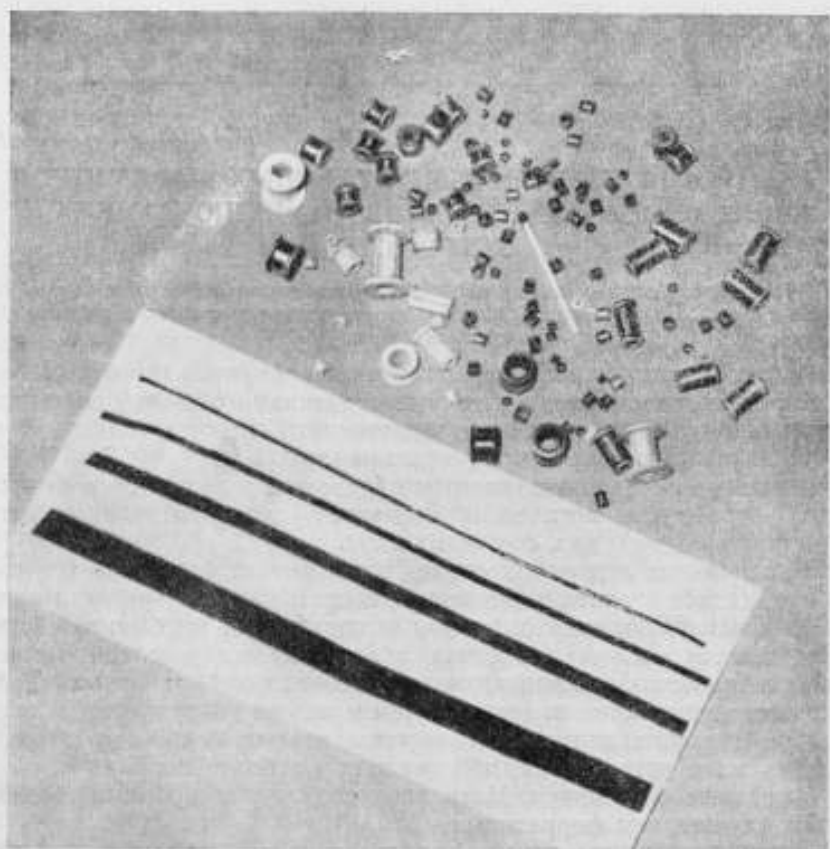


Рис. 1. Образцы лент, опорных каркасов и готовых сердечников.

Поперечное сечение сердечника, подсчитанное как

$$Q = n\Delta h,$$

изменяется от $2,5 \cdot 10^{-4}$ см² до $1 \cdot 10^{-1}$ см², а следовательно, и остаточный магнитный поток Φ меняется в очень широких пределах. В зависимости от размера сердечника и марки материала остаточный поток в сердечниках имеет значения $15 \cdot 10^{-1} \div 15 \cdot 10^2$ мкс.

Такая большая разница в магнитных параметрах и геометрических размерах сердечников накладывает специальные требования на стенд для снятия указанных импульсных характеристик.

Принципиальная схема стенда в основных чертах похожа на схемы приборов, разработанных ранее в лаборатории магнитных элементов ИТМ и ВТ АН СССР [2], однако она имеет ряд отличительных особенностей в связи с исследованием импульсных свойств микронных сердечников.

На рис. 1 показаны образцы лент для сердечников, опорных каркасов, а также готовые микронные сердечники, изготовленные в ИТМ и ВТ АН СССР.

При разработке стенда для снятия импульсных характеристик микронных сердечников руководствовались следующими техническими требованиями:

1) обеспечить снятие импульсных характеристик с сердечников из указанных марок сплавов, толщин лент и приведенных геометрических размеров сердечников;

2) создать такую программу следования импульсов токов перемагничивания, чтобы обеспечивать возможность снятия требуемых импульсных характеристик.

Для обеспечения указанных требований стенд должен удовлетворять следующим условиям:

1) амплитуда импульсов токов, которыми перемагничивается сердечник, должна меняться в большом диапазоне — от долей ампера до нескольких ампер;

2) длительность импульсов токов перемагничивания $t_{и}$ должна быть больше времени процесса перемагничивания сердечника τ в магнитном поле H_{min} , где H_{min} — нижняя граница диапазона значений магнитных полей, при которых требуется определить импульсные характеристики микронных сердечников;

3) импульсы тока по форме должны быть близкими к прямоугольным, и плоская часть импульса не должна иметь спада более установленной величины (допустимый спад по вершине 20%);

4) длительность переднего фронта импульса тока перемагничивания $\tau_{ф}$ должна быть много меньше, чем время перемагничивания испытуемого сердечника τ , во всем диапазоне изменения амплитуды перемагничивающего поля, т. е. $\tau_{ф} \ll \tau$;

5) внутреннее сопротивление источника должно быть много больше, чем сопротивление испытуемого сердечника.

На рис. 2 приведена программа следования импульсов токов перемагничивания, которая позволяет снимать указанные импульсные характеристики ленточных сердечников.

При воздействии на сердечник импульса тока с амплитудой I_1 происходит перемагничивание сердечника из состояния, определяемого отрицательной остаточной индукцией $-B_r$, в состояние, характеризующееся положительной остаточной индукцией $+B_r$. При этом в выходной обмотке возникает большой по амплитуде полезный сигнал. Амплитуду этого сигнала будем называть полезным сигналом и обозначать E_c .

При воздействии второго импульса тока I_2 сердечник меняет свое состояние только в зоне насыщения от $+B_r$ до $+B_{max}$ и обратно. При этом в выходной обмотке наводится малый по амплитуде сигнал помехи.

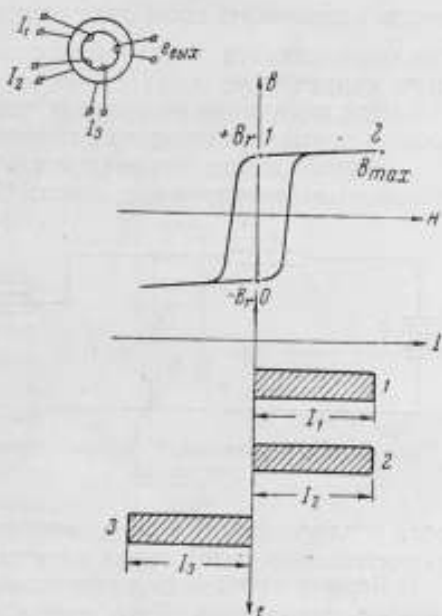


Рис. 2. Программа следования импульсов токов перемагничивания.

Амплитуду этого сигнала будем называть сигналом помехи и обозначать E_n .

При воздействии третьего импульса тока I_3 сердечник возвращается в исходное состояние (в точку B , на петле гистерезиса).

Из полученных значений E_c и E_n определяется отношение $\frac{E_c}{E_n} = f(H)$, т. е. импульсный коэффициент прямоугольности, а измеренная продолжительность выходных импульсов τ при данной напряженности магнитного поля дает значения $\frac{1}{\tau} = f(H)$ и из этой зависимости определяется значение постоянной перемагничивания S испытуемого сердечника: $S = (H - H_c)\tau$.

Для получения импульсов тока с указанными выше параметрами можно применить несколько методов.

Первый метод заключается в формировании таких импульсов тока с помощью электронных ламп. Используются релаксационные схемы

(триггеры, мультивибраторы) или же схемы с формированием прямоугольных импульсов тока из гармонического напряжения [3]. Амплитуды импульсов токов в несколько ампер получают при последующем усилении сформированных импульсов. При таком способе формирования импульсы



Рис. 3. Принципиальная схема генератора импульсов.

тока с длительностью переднего фронта 30—50 μ сек получают за счет значительного усложнения электронных схем.

Второй метод — формирование прямоугольных импульсов тока с помощью тиратронов. Этот метод позволяет получать импульсы токов с длительностью переднего фронта порядка 10 μ сек. При этом используется разряд анодной емкости тиратрона на сопротивление большой величины (порядка нескольких мегом) в катоде тиратрона и параллельную ему емкость. Снимаемый с катодного сопротивления импульс затем усиливается.

Для получения импульсов тока с длительностью переднего фронта порядка 10 μ сек может быть использован и первый метод, но в этом случае передний фронт импульса формируется с помощью тиратронов [4].

Третий метод — использование разряда отрезка длинной линии с равномерно распределенными параметрами через активное сопротивление с применением в качестве коммутирующего устройства тиратронов.

Остановимся подробнее на этом методе, так как он применяется в описываемом стенде.

На рис. 3 дана принципиальная схема генератора импульсов с использованием разрядной линии и коммутирующего устройства.

На указанном рисунке обозначено: L — разрядная линия; R_n — сопротивление нагрузки; E — источник постоянного напряжения; K — ключ; R — нагрузка в цепи источника напряжения.

В качестве разрядной линии может быть использован отрезок кабеля, имеющий длину l и волновое сопротивление Z_0 .

Если отрезок кабеля зарядить от источника постоянного напряжения E , а затем замкнуть ключ K в цепи нагрузки R_n , то начнется разряд линии через сопротивление R_n , при условии, что $R \gg R_n$. На сопротивлении R_n образуется импульс напряжения. В зависимости

от величины сопротивления нагрузки R_n импульс примет вид, показанный на рис. 4.

На рис. 4, а дана форма импульса для случая $R_n = Z_0$. Импульс напряжения имеет прямоугольную форму с амплитудой

$$U_{\max} = \frac{E}{R_n + Z_0} \cdot R_n = \frac{E}{2}.$$

Длительность импульса тока определяется двукратным прохождением волны тока вдоль кабеля и выражается зависимостью

$$t_n = 2lZ_0C,$$

где C — погонная емкость линии, ф/м.

На рис. 4, б показана форма импульса при $R_n < Z_0$. При этом получается ступенчатый двухполярный импульс напряжения.

На рис. 4, в дана форма импульса при $R_n > Z_0$; при этом получается однополярный ступенчатый импульс напряжения.

Из рассмотрения рис. 4 очевидно, что форма получаемого импульса в значительной мере зависит от степени согласования разрядной линии с нагрузкой. Кроме того, форма получаемого импульса зависит от характеристик разрядной линии (волнового сопротивления, коэффициента затухания, емкости), от вида коммутирующего устройства и от режима его работы.

Применение в импульсном стенде в качестве коммутирующего устройства тиратронов позволяет получать импульсы токов перематничивания с необходимой крутизной переднего фронта, большой мощностью в импульсе и дает возможность легко управлять моментом коммутации. Для обеспечения стабильности коммутации применяемые тиратроны должны иметь высокую скорость срабатывания. Характеристика ионизации тиратрона должна быть такой, чтобы обеспечивать малую длительность переднего фронта импульсов токов перематничивания.

На основании изложенных соображений и был разработан описываемый прибор.

На рис. 5 приведена блок-схема прибора, предназначенного для определения времени перематничивания микронных сердечников и величины полезных сигналов и сигналов помех.

Стенд формирует пачки импульсов тока (по три импульса в каждой пачке), следующие с частотой 50—100 гц. Такая частота следования пачек импульсов тока обеспечивает нормальную работу тиратрона (зажигание и гашение) и достаточно полный заряд длинной линии, а также обеспечивает возможность визуального наблюдения на экране осциллографа изучаемых явлений.

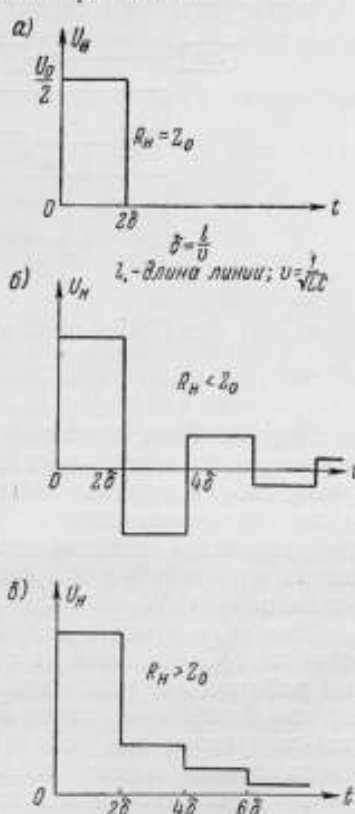


Рис. 4. Импульс напряжения при различных значениях сопротивления нагрузки.

Амплитуду импульсов тока и интервалы времени между ними можно менять. Прибор позволяет получать импульсы тока переменной амплитуды от десятых долей ампера до 7 а, в зависимости от режима его работы.

Рассмотрим работу прибора покаскадно. Всего каскадов три. Первым блоком каждого из каскадов является мультивибратор ЗМ, последним блоком — тиратрон T_2 . В аноде тиратрона стоит длинная линия, разряд которой через обмотку сердечника и сопротивление R_x в катode тиратрона создает прямоугольный импульс тока с крутым передним фронтом. Хотя применение длинных линий делает аппаратуру несколько громоздкой, но отказ от применения длинных линий для создания прямоугольных импульсов тока достаточно большой амплитуды с крутым передним фронтом ведет к значительному усложнению электронных блоков и, следовательно, снижает надежность работы прибора.

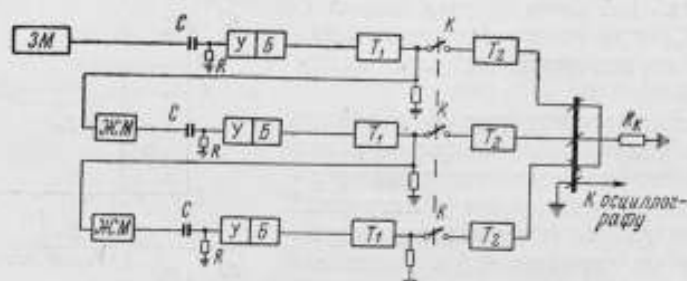


Рис. 5. Блок-схема прибора для определения времени перемагничивания и величины э. д. с. полезных сигналов и сигналов помехи.

Первый блок прибора — задающий мультивибратор ЗМ, который вырабатывает импульсы с частотой следования $50 \div 100$ гц. Мультивибратор собран на лампе типа 6Н1П по схеме с катодной связью и двумя анодно-сеточными связями. Подстройка частоты производится изменением величины сопротивления в цепи сетки левого триода лампы. На выходе мультивибратора получается положительный импульс длительностью порядка 80 мксек.

Сигнал с выхода задающего мультивибратора, дифференцируясь цепочкой RC, попадает на сетку левого триода лампы типа 6Н6П, который работает как усилитель У. На правом триоде этой же лампы собран ждущий блокинг-генератор Б. В выходной обмотке трансформатора блокинг-генератора при подаче на сетку положительного сигнала с анода левого триода лампы возникает весьма кратковременный (порядка 1 мксек) импульс амплитудой в 130—160 в. Для трансформаторов блокинг-генераторов в стенде были использованы сердечники из материала оксифер-2000 с размерами: $D = 18$ мм, $d = 8$ мм, $h = 5$ мм.

Положительным импульсом с выходной обмотки трансформатора блокинг-генератора поджигается тиратрон T_1 , в аноде которого, в зависимости от выбранного режима работы, оказывается подключенной длинная линия, разомкнутая на конце, либо конденсатор.

Импульсом разряда длинной линии либо конденсатора через тиратрон T_1 поджигается мощный тиратрон T_2 и этим же импульсом запускается ждущий мультивибратор. Последний собран на лампе типа 6Н1П с общей катодной связью, положительным смещением на сетке и сеточно-анодной связью. Он выполняет роль элемента задержки на время t , через которое должны быть зажжены тиратроны T_1 и T_2 второго каскада прибора. Меняя сопротивление 220 ком в цепи сетки ждущего

шего мультивибратора, можно менять время задержки импульса тока тиратрона T_2 второго каскада относительно импульса тока тиратрона T_2 первого каскада в пределах $10 \div 60$ мксек. Задержка импульсов тока относительно друг друга получается потому, что заторможенный блокинг-генератор, собранный на правом триоде лампы 6Н6П, запускается положительным импульсом, который соответствует заднему фронту импульса с выхода мультивибратора.

Третий каскад совершенно аналогичен второму каскаду. Импульс тока с тиратрона T_2 третьего каскада сдвинут во времени относительно импульса тока тиратрона T_2 второго каскада за счет задержки, выполненной на ждущем мультивибраторе.

Для получения импульсов тока большой мощности в приборе применены высоковольтные тиратроны типа ТГИ 35/3 с водородным наполнением. Прямоугольные импульсы тока получаются в результате разряда длинных линий, стоящих в анодах тиратронов, через тиратроны. Поскольку от выбора режима тиратронов существенно зависит работа прибора, имеет смысл подробнее остановиться на их работе.

В нашем случае сопротивление нагрузки, на которую разряжается длинная линия

$$R_n = R_r + R_k + Z_{\text{серд}}$$

где R_r — внутреннее сопротивление тиратрона;

R_k — сопротивление в катод тиратрона;

$Z_{\text{серд}}$ — сопротивление, вносимое перемещающимся сердечником в намагничивающую цепь.

Величину $Z_{\text{серд}}$ будем определять как $\frac{e_{\text{max}}(t)}{i}$, где $e_{\text{max}}(t)$ — максимум э. д. с., наводимой в намагничивающей обмотке, а i — ток, протекающий при перемещении сердечника через эту обмотку.

Следует заметить, что R_r и $Z_{\text{серд}}$ меняются по величине при разряде линии, поэтому для получения импульса тока прямоугольной формы надо стремиться, чтобы R_n и Z_0 было значительно больше R_r и $Z_{\text{серд}}$.

Так как тиратрон способен проводить ток лишь в одном направлении, то в случае $R_n < Z_0$ на испытываемый сердечник, как и в случае $R_n = Z_0$, будет действовать лишь импульс тока положительной полярности. Можно сказать, что такое рассогласование не приведет к какому-либо изменению программы токовых импульсов, в результате воздействия которых меняется намагниченность сердечника. Однако в результате рассогласования сразу же после окончания импульса тока напряжение на аноде тиратрона становится отрицательным. Величина этого обратного напряжения зависит от степени рассогласования и не должна превышать номинального для данного тиратрона значения. Для тиратрона типа ТГИ 35/3 максимально допустимое обратное напряжение 3 кВ.

Заряд длинной линии происходит через сопротивление в цепи анода тиратрона $R_{\text{ат}}$. Величина этого сопротивления выбирается из следующих соображений.

$R_{\text{ат}}$ должно выбираться так, чтобы за время между приходом следующих друг за другом поджигающих импульсов на сетку тиратрона длинная линия могла бы зарядиться до величины напряжения источника питания E , к которому тиратрон подключен. Это требование является ограничением величины $R_{\text{ат}}$ по максимуму.

С другой стороны, сопротивление $R_{\text{ат}}$ не должно быть слишком малым, так как в этом случае процесс заряда длинной линии происходит

быстро и напряжение на аноде тиратрона может достичь напряжения зажигания в момент, когда еще не произошла полная деионизация тиратрона. Если это произойдет, то тиратрон начнет непрерывно проводить ток и в конечном счете выйдет из строя.

Из этих соображений выбирается некоторое оптимальное значение $R_{ат}$, при котором на время разряда линии можно было бы пренебречь влиянием зарядного тока через сопротивление $R_{ат}$.

В качестве длинных линий в стенде используются бухты кабеля РК-1. Получаемые импульсы тока от разряда длинных линий через тиратроны ТГИ 35/3 имеют длительность несколько микросекунд и максимальную амплитуду до 4—7 а в зависимости от величины сопротивления в катодах тиратронов.

Стенд позволяет работать в двух режимах. При исследовании динамики перемангничивания магнитных сердечников с малыми геометрическими размерами испытания проводятся на тиратронах T_1 . В этом случае тиратроны T_2 отключаются переключателем K (рис. 5). К анодам тиратронов T_1 вместо конденсаторов присоединяются длинные линии. Первичные обмотки исследуемого сердечника включаются в рассечку катодов тиратронов T_1 последовательно с катодными сопротивлениями.

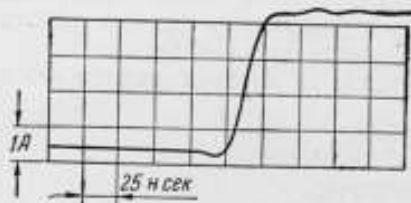


Рис. 6. Осциллограмма импульса тока.

На осциллограмме (рис. 6) показан передний фронт импульса тока. Разряд длинных линий через тиратроны T_1 позволяет получать импульсы тока с амплитудой 3,5—4 а и длительностью переднего фронта 20—30 нсек.

Прямоугольность импульса тока зависит от геометрических размеров перемангничиваемого сердечника и от числа витков намагничивающей обмотки. Чем больше отношение $\frac{Z_{серд}}{R_T + R_K + Z_0}$, тем больше искажается импульс тока во время перемангничивания сердечника. Сопротивление, вносимое сердечником в намагничивающую цепь, можно уменьшить, взяв меньшее число витков намагничивающей обмотки.

Если для исследования динамики перемангничивания сердечника требуется создать магнитное поле большой напряженности при малом числе витков первичной обмотки или же длина средней силовой линии сердечника велика, то переключатель K замыкается и длинные линии включаются в аноды тиратронов T_2 . К анодам тиратронов T_1 подключаются конденсаторы. Обмотки исследуемого сердечника включаются в рассечку катодных цепей тиратронов T_2 последовательно с катодными сопротивлениями.

В этом режиме стенд позволяет получать импульсы тока большой мощности. Амплитуда импульсов тока зависит от величины сопротивления, подключенного к катодам тиратронов T_2 . При $R_K = 10$ ом можно получить импульсы тока амплитудой в 15 а. Однако ставить в катоды тиратронов очень маленькое сопротивление нецелесообразно, так как при этом уменьшается внутреннее сопротивление источника тока. При снятии импульсных характеристик для разных сердечников величины R_K были выбраны равными 51 ом или же 200 ом. Длительность фронта импульсов тока от тиратронов T_2 около 0,15 мксек. Однако, так как этот режим предназначен главным образом для снятия импульсных характеристик сердечников из лент 50НП и 34НКМП толщиной в 5 и

10 мк, перемagnичивание которых происходит довольно медленно, стeнд в таком режиме позволяет снять импульсные характеристики сердечников и при значительных напряженностях поля ($H = 10-20 H_c$).

Следует обратить внимание, что катоды тиратронов T_2 связаны и нагружены на одно и то же сопротивление. Это сделано из следующих соображений.

При перемagnичивании сердечника импульсом тока одного из тиратронов во всех обмотках сердечника наводится э. д. с. В зависимости от направления намотки витков сердечника, хотя бы на одной первичной обмотке наведется отрицательная э. д. с. Она может достигнуть достаточной величины (в зависимости от толщины ленты, числа витков ленты, из которой намотан сердечник, от величины напряженности поля и т. д.). Индуктирование такой э. д. с. в обмотке, включенной в цепь катода тиратрона, может привести к нежелательному открытию тиратрона. Для того чтобы этого не произошло, надо повысить потенциал катода или же подать отрицательное напряжение на сетку. Практически более легким и надежным является первый вариант — повышение потенциала катода. Это достигается тем, что все три тиратрона нагружаются на одно и то же сопротивление

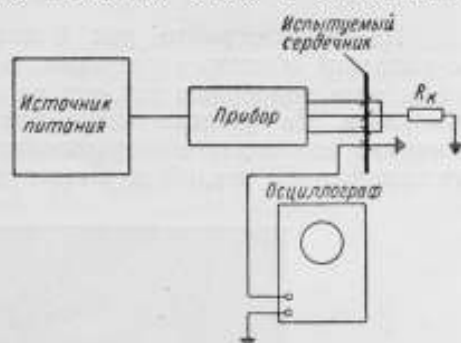


Рис. 7. Блок-схема аппаратуры для исследования динамического перемagnичивания ленточных сердечников.

Если стeнд рассчитывается на снятие характеристик сердечников, параметры которых таковы, что нежелательного открытия тиратрона

произойти не может, то катоды тиратронов нагружаются на отдельные сопротивления.

В комплект аппаратуры, предназначенной для проведения экспериментов по исследованию динамического перемagnичивания ленточных сердечников, входят следующие приборы: прибор для проверки сердечников, высоковольтный источник напряжения и осциллограф (рис. 7).

Изменяя величину напряжения на анодах тиратронов, можно менять амплитуду импульсов тока.

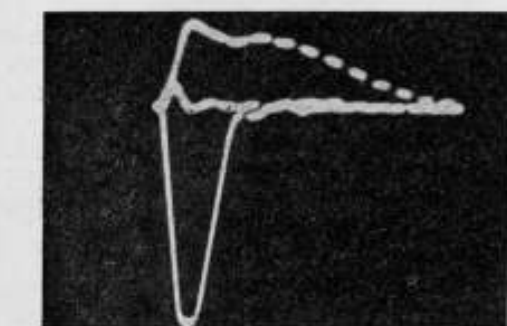


Рис. 8. Осциллограмма импульсов перемagnичивания сердечника из сплава 79НМ с толщиной ленты 3 мк (метки 0,1 мксек).

Градуировка прибора осуществляется снятием зависимости величины намагничивающего тока от величины анодного напряжения тиратронов. Для обоих видов тиратронов — это прямая.

Для тиратронов ТГЗ 0,1/1,3 максимальное анодное напряжение 600 в (от стандартного источника питания УИП-1).

Для тиратронов ТГИ 35/3 максимальное анодное напряжение 3 кВ (специальный источник высокого напряжения).

В проведенных экспериментах менялась амплитуда двух импульсов тока, амплитуда третьего импульса тока задавалась постоянной, равной максимальной напряженности магнитного поля, при котором испытывался сердечник. Выбранная программа позволяет снимать для испытываемых сердечников зависимость $\frac{1}{\tau} = f(H)$ и измерять отношение

$$\frac{E_c}{E_n} = f(H).$$

На осциллограмме рис. 8 показаны импульсы перемагничивания с выходной обмотки сердечника. Временные интервалы между импульсами тока подобраны так, что на экране осциллографа видны все три импульса. На осциллограмме большой по амплитуде положительный импульс соответствует перемагничиванию сердечника по полной петле гистерезиса E_c , малый по амплитуде импульс — перемагничиванию сер-

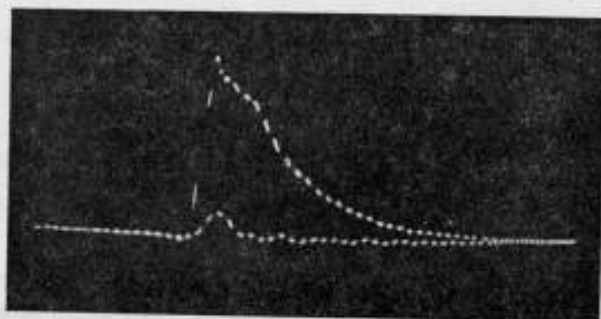


Рис. 9. Осциллограмма импульсов э. д. с. полезного сигнала и сигнала помехи для сердечника из сплава 79НМ с толщиной ленты 3 мк при $H_{max} = 2 \text{ э}$ (метки 10 нсек).

дечника по пологой части петли гистерезиса E_n . Отрицательный импульс соответствует импульсу тока, которым сердечник перемагничивается в исходное состояние. На осциллограмме рис. 9 показаны E_c и E_n для сердечника из сплава 79НМ с толщиной ленты 3 мк.

В стенде предусмотрена возможность изменения длительности фронтов импульсов тока. Для этой цели параллельно намагничивающей обмотке сердечника и сопротивлению R_k подключаются емкости. При перемагничивании сердечника импульсами с различными длительностями передних фронтов существенно меняется отношение $\frac{E_c}{E_n}$.

В табл. I приведены выходные параметры прибора при использовании двух типов тиратронов.

Для снятия динамических характеристик сердечников требуется достаточно тщательное проведение экспериментов — сведение к минимуму всех факторов, которые могут привести к ошибкам в измерениях. Одним из таких факторов является влияние паразитных параметров вторичной цепи на процесс перемагничивания сердечника. Действительно, при подключении выходной обмотки сердечника к осциллографу эта обмотка оказывается замкнутой на емкость C , равную сумме входной емкости осциллографа и емкости подводящих к осциллографу проводов. Чем больше э. д. с., индуктируемая в выходной обмотке, чем быстрее перемагничивается сердечник и больше емкость C , тем большую величину имеет ток во вторичной обмотке, размагничивающее

влияние которого, вообще говоря, нужно учитывать. Кроме того, емкость вторичной цепи C с индуктивностью сердечника образует контур, в котором при перемагничивании сердечника возникают колебания. Это может привести к существенному искажению импульса, наблюдаемого на осциллографе, с выходной обмотки сердечника, особенно при малом времени перемагничивания сердечника.

Таблица 1

Выходные параметры прибора	Тип тиратрона	
	ТГЗ 0,1,1,3	ТТИ 35/3
Максимальный намагничивающий ток $I_{\max}, \text{а}$	4 (При $U_{a, \tau_2} = 600 \text{ в}$ $R_K = 51 \text{ ом}$)	8 (При $U_{a, \tau_2} = 2000 \text{ в}$ $R_K = 200 \text{ ом}$)
Длительность переднего фронта τ_{Φ} , нсек	30-40	150
Длительность импульсов перемагничивания $t_{\text{и}}$, миксек	~3,5	~3,5
Спад по вершине, %	20	20
Частота следования пачек импульсов f , гц	100	100

Таблица 2

Импульсные параметры	Марка сплава и толщина ленты в мк						
	79НМ		ЗАНКМП			50НП	
	2	3	5	5	10	5	10
$S, \text{э} \cdot \text{миксек}$	0,3	0,4	0,6	1	1,8	1,4	2
$\tau, \text{миксек}$ при $H_{\max} = H_c$	0,2	0,3	0,8	0,5	1	1,45	0,8
$\tau, \text{миксек}$ при $H_m = 3 \text{ э}$	0,1	0,15	0,25	0,7	1,5	1	1,6
$H_0, \text{э}$	0,7	0,3	0,25	1,8	1,6	1,5	1,25
$\frac{E_c}{E_n}$ при $H_{\max} = 10H_c$ $\tau_{\Phi} = 30-40 \text{ нсек}$	4	4	3	6	3	2,5	2
$\frac{E_c}{E_n}$ при $H_{\max} = 10H_c$ $\tau_{\Phi} = 200 \text{ нсек}$	—	8	—	13	—	6	—

В опытах по исследованию динамики перемагничивания сердечников надо также иметь в виду, что в выходной обмотке может наводиться паразитная э. д. с. за счет индуктивной связи между обмотками сердечника по воздуху. Ее можно уничтожить введением компенсационной обмотки.

Таким образом, при проведении экспериментов надо стремиться делать выходную обмотку всего лишь из одного витка и снимать не усредненные характеристики сразу с нескольких сердечников, а проводить эксперименты с каждым сердечником в отдельности, так как влияние вторичной цепи в этом случае будет меньшим.

На описанном приборе были проведены импульсные испытания сердечников из указанных марок сплавов и типоразмеров.

В табл. 2 приведены усредненные импульсные параметры микро-ных сердечников из сплавов 79НМ (аналогичные данные имеют сердеч-

ники из лент той же толщины из сплава 79НМА), 34НМКП и 50НП: постоянная перемагничивания S , величина порогового поля H_0 , время перемагничивания τ

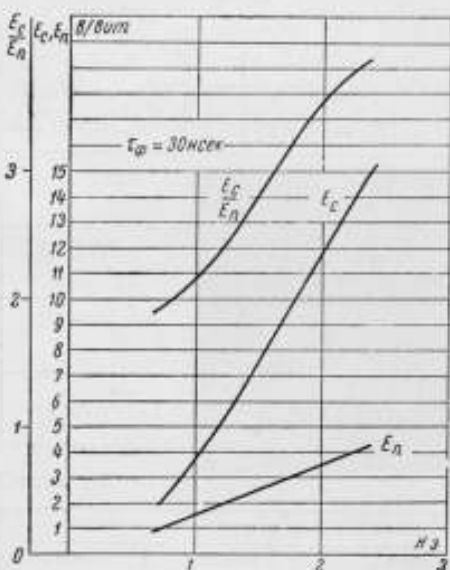


Рис. 10. Кривые зависимости E_c , E_n от величины напряженности магнитного поля для сердечника размерами $d_{ср} = 5,4$ мм и $h = 10$ мм из сплава 79НМ с толщиной ленты 3 мк.

$\frac{1}{\tau}$ мксек



Рис. 11. Зависимость $\frac{1}{\tau}$ от напряженности магнитного поля для сердечника размерами $d_{ср} = 5,4$ мм и $h = 10$ мм из сплава 79НМ с толщиной ленты 3 мк.

для разных значений перемагничивающего поля H_{max} , отношение полезного сигнала к сигналу помехи $\frac{E_c}{E_n}$ для двух значений переднего фронта τ_ϕ импульсов перемагничивания.

Из данных таблицы видно, что наименьшие значения S , τ и H_0 имеют микроновые сердечники из лент сверхтонкого проката с толщиной ленты 2 ÷ 3 мк сплава 79НМ (аналогично 79НМА).

На рис. 10, 11 приведены кривые зависимости

$$E_c = f(H); \quad E_n = f(H); \quad \frac{E_c}{E_n} = f(H); \quad \frac{1}{\tau} = f(H)$$

для сердечников из сплава 79НМ с толщиной ленты 3 мк.

Помимо определения указанных импульсных параметров при комнатной температуре, проводилось измерение этих параметров при изменении температуры окружающей среды.

На приборе также определялось влияние длительности переднего фронта τ_ϕ импульсов токов перемагничивания на отношение $\frac{E_c}{E_n}$, характеризующее степень прямоугольности петли гистерезиса в импульсном режиме.

Исследовалось влияние величины нагрузки, включаемой в выходную обмотку сердечника.

Если при испытании ферритовых сердечников временные параметры сердечников — зависимость времени перемангничивания τ от напряженности приложенного магнитного поля H и постоянная перемангничивания S — определяются маркой материала феррита и геометрическими размерами сердечника, т. е. коэффициентом $\gamma = \frac{d}{D}$, где d — внутренний диаметр сердечника и D — наружный диаметр [5], то для ленточных сердечников время перемангничивания, кроме того, зависит от толщины ленты и качества изготовления сердечников.

Технология производства ленточных сердечников такова, что возможны следующие дефекты: 1) замыкание между витками ленты сердечника за счет заусенцев, получающихся при резке ленты; 2) спекание витков ленты во время отжига за счет недостаточной толщины покрытия межвитковой жаропрочной изоляцией; 3) замыкание между витками ленты во время закрепления последнего витка точечной сваркой.

Указанные дефекты сердечников не могут быть обнаружены ни визуальным наблюдением на осциллографической установке для снятия петель гистерезиса, ни по статическим характеристикам, снятым баллистическим методом, а определяются только импульсными испытаниями. Сердечники с перечисленными технологическими дефектами имеют значительно большее время перемангничивания, чем сердечники из той же ленты, не имеющие указанных недостатков.

Таким образом, прибор может применяться в качестве поверочного стенда для отбора и проверки сердечников при использовании их в конкретных схемах.

Полученные на приборе импульсные параметры достаточно полно характеризуют свойства микронных сердечников при работе их в импульсных схемах, позволяют выбрать марку сплава, его толщину, необходимый режим работы и определить возможность применения их в различных устройствах вычислительной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бардиж В. В., Бережной Е. Ф., Мохель Л. Л., Сметанина В. М., Статические и импульсные характеристики микронных сердечников, Институт ТМ и ВТ АН СССР, 1961.
2. Визун Ю. И., Аппаратура для исследования свойств магнитных сердечников, Институт ТМ и ВТ АН СССР, 1957.
3. Скуцарев В. В., Исмаилов Ш. Ю., Коричнев П. П., «Ферриты», изд. АН БССР, 1960.
4. Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1956.
5. Бардиж В. В., Вопросы импульсного перемангничивания ферритовых сердечников, Институт ТМ и ВТ АН СССР, 1958.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

В статье рассматриваются и анализируются методы, применяемые в Институте металлокерамики для испытаний ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса в квазистатическом и динамическом режимах.

Ферриты с прямоугольной петлей гистерезиса представляют собой особый класс магнитных материалов, который характеризуется высоким удельным электросопротивлением, высоким значением относительной остаточной индукции (коэффициента прямоугольности) и целым рядом других особенностей.

Учет этих свойств ферритов, с одной стороны, требует существенных дополнений к общепринятой методике магнитных измерений, а с другой, — позволяет провести упрощение некоторых методов измерения магнитных величин.

Определение магнитной индукции баллистическим методом

При определении магнитной индукции ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса баллистическим методом необходимо учитывать скачкообразный характер перемагничивания материала и практическое отсутствие вихревых токов (для ферритов марки ИМ-2 $\rho_x = 10^4$ ом·см).

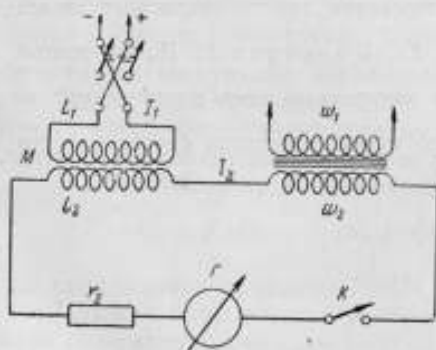


Рис. 1. Схема измерительной цепи баллистической установки.

При измерениях на баллистической установке измерительная обмотка образца соединяется последовательно с вторичной обмоткой катушки взаимной индукции (рис. 1).

Градуировка баллистического гальванометра производится коммутированием тока в первичной обмотке катушки взаимной индукции; при этом импульс тока, возникающий во вторичной обмотке, перемагничивает ферритовый сердечник.

Дополнительная э. д. с. самоиндукции, возникающая при перемагничивании ферритового сердечника, приводит к уменьшению тока, про-

текающего через гальванометр, а следовательно, и к уменьшению показаний прибора.

Проведем оценку погрешности, возникающей в результате перемагничивания ферритового сердечника при градуировке баллистического гальванометра.

Процессы, происходящие в измерительной цепи баллистической установки при градуировке, можно описать следующим уравнением:

$$M \frac{di}{dt} = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \omega_2 S \frac{dB}{dt} \cdot 10^{-8}, \quad (1)$$

где i — ток в первичной цепи катушки взаимной индукции;
 M — взаимная индуктивность катушки взаимной индукции;
 i_2 — ток в измерительной цепи;
 L_2 — индуктивность вторичной обмотки катушки взаимной индукции;
 ω_2 — число витков измерительной обмотки образца;
 S — сечение образца;
 B — индукция образца;
 r_2 — сопротивление измерительной цепи.

Проинтегрировав уравнение (1) и учтя, что

$$r_2 Q \cdot 10^8 = C'_6 \cdot \alpha_{\max},$$

где Q — количество электричества, протекающее через гальванометр

$$\text{за время импульса тока } \left| Q = \int_0^T i dt \right|;$$

C'_6 — приведенная постоянная баллистического гальванометра;

α_{\max} — максимальное отклонение баллистического гальванометра, получим:

$$M \Delta I_1 = r_2 Q + S \omega_2 \Delta B \cdot 10^{-8},$$

так как $L_2 \int_0^T di = 0$;

$$C'_6 \alpha_{\max} = 2 M I_1 \cdot 10^8 - 2 S \omega_2 B_r,$$

так как $\Delta I_1 = 2 I_1$, $\Delta B = 2 B_r$,

где B_r — остаточная индукция образца при данном поле.

Итак,

$$C'_6 = \frac{2 M I_1 \cdot 10^8}{\alpha_{\max}} \left(1 - \frac{S \omega_2 B_r}{M I_1 \cdot 10^8} \right). \quad (2)$$

Сравнивая с обычным выражением для баллистической постоянной:

$$C'_6 = \frac{2 M I_1 \cdot 10^8}{\alpha_{\max}}, \quad (3)$$

мы видим, что в результате перемагничивания ферритового сердечника возникает относительная погрешность:

$$\varepsilon_{C'_6} = \frac{S \omega_2 B_r \cdot 10^{-8}}{M I_1} \%. \quad (4)$$

Например, при измерении на баллистической установке с гальванометром ГЗБ-47 ферритов марки ИМ-2 величина B_r (при градуировке) достигает 25–50 гс. При этом $\varepsilon_{C'_6} = 5–10\%$, если $S = 0,5 \text{ см}^2$; $\omega_2 = 100$ витков, $M = 0,01 \text{ гн}$, $I = 30 \text{ ма}$.

Вышеуказанную погрешность можно исключить, если при градуировке не производить перемагничивания ферритового сердечника.

Обычно при градуировке образец переходит из состояния $-B_r$ в состояние $+B_r$. Если же переводить образец из состояния $+B_r$ снова в состояние $+B_r$, то при этом $\Delta B = 0$.

Следовательно, необходимо, чтобы при градуировке ток дважды проходил в одном и том же направлении: первый раз при приведении сердечника в состояние $+B_r$; второй раз для собственно градуировки.

Для этого в схеме градуировки (рис. 1) при замкнутом гальванометре коммутация тока I_1 производится дважды: первый раз при замкнутом, второй раз при разомкнутом ключе K . Затем включается гальванометр и коммутация тока I_1 производится третий раз, так что ток I_2 в этом случае протекает в том же направлении, что и при первой коммутации.

При таком методе градуировки никаких нежелательных явлений не возникает.

Определение начальной магнитной проницаемости ферритов

Высокое значение удельного объемного сопротивления ферритов позволяет использовать для определения начальной магнитной проницаемости μ_0 простую схему

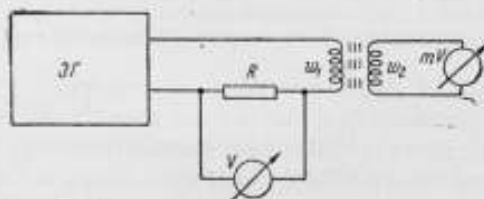


Рис. 2. Блок-схема измерения начальной проницаемости.

(рис. 2) и проводить это измерение на тех же образцах торoidalной формы, которые используются для баллистических измерений.

Намагничивающая обмотка образца с числом витков w_1 подключается через известное безреактивное сопротивление R к генератору (например ЗГ-10). Намагничивающий ток, который выбирается достаточно малым ($H = 0,005$ э), определяется по падению напряжения U на сопротивлении R при помощи лампового вольтметра.

Измерительная обмотка образца с числом витков w_2 подключается к ламповому милливольтметру (например МВЛ-2М) или измерительному усилителю (например 28ИМ), измеряющему индуктированное напряжение E .

Осциллографический метод измерения магнитных характеристик

Применение осциллографического метода позволяет резко ускорить процесс измерения основных магнитных характеристик различных материалов. Применимость этого метода ограничивается лишь точностью измерения. Вместе с тем осциллографический метод является одним из основных при исследовании магнитных материалов в переменных полях звуковых и радиочастот.

Принцип действия установок для наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа широко известен: намагничивающая обмотка создает в образце переменное магнитное поле, чаще всего синусоидальной формы. Электродвижущая сила, индуктирующаяся во вторичной обмотке и пропорциональная производной от индукции в образце по времени, подается на интегратор, с выхода которого напряжение, пропорциональное индукции в образце, усиливается и прикладывается к вертикально-отклоняющим пластинкам электронно-лучевой трубки. Горизонтальное отклонение луча осуществляется напряжением, пропорциональ-

ным намагничивающему полю (это напряжение снимается обычно с малого безреактивного сопротивления, включенного последовательно в цепь намагничивающего тока).

Для материалов с высоким удельным сопротивлением, какими являются ферриты, вихревые токи в переменных полях вплоть до радиочастотных незначительны, и поэтому получаемая на экране осциллографа кривая является изображением динамической петли гистерезиса.

Основные погрешности при определении по этой петле гистерезиса магнитных характеристик испытываемого материала связаны с работой интегратора, на чем следует подробнее остановиться, учтя особенности измерения параметров ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, для которых удается получить упрощенные расчетные формулы.

При перемагничивании феррита с прямоугольной петлей гистерезиса основное изменение индукции происходит в течение короткого про-

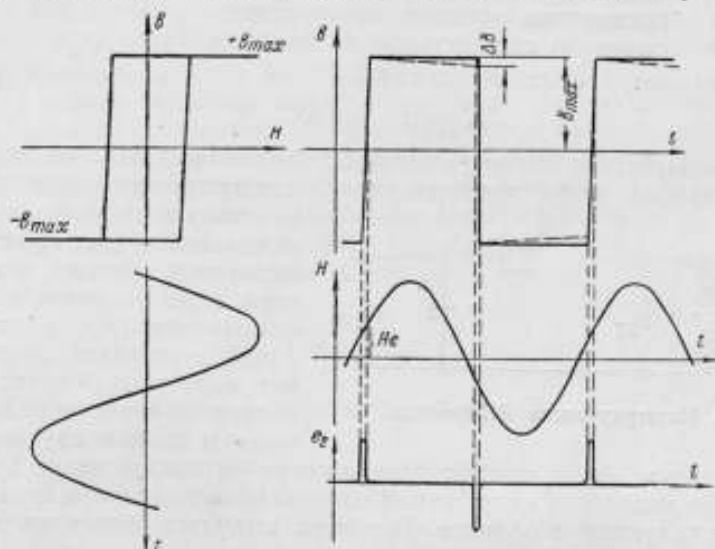


Рис. 3. Перемагничивание материала с идеализированной петлей гистерезиса переменным магнитным полем.

межутка времени, а в остальное время индукция незначительно меняется на участках насыщения, так как обычно при измерениях перемагничивание ведется по предельной петле гистерезиса.

По этой причине электродвижущая сила на вторичной обмотке имеет вид коротких разнополярных импульсов, длительность которых, например, для феррита марки ИМ-2 составляет примерно 2,5% длительности периода намагничивающего переменного синусоидального тока при амплитуде намагничивающего магнитного поля порядка нескольких эрстед (коэрцитивная сила феррита ИМ-2 $H_c = 0,4$ э). Величина э. д. с. в промежутке между импульсами примерно равна нулю и тем ближе приближается к нулю, чем выше коэффициент прямоугольности петли гистерезиса.

Рассмотрим идеализированную петлю гистерезиса с коэффициентом прямоугольности, равным единице (рис. 3). Образец с такой петлей подвергается перемагничиванию синусоидальным полем с амплитудой, в несколько раз превышающей коэрцитивную силу (обычно параметры ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса измеряются в поле, максимальное значение напряженности которого превышает коэрцитивную силу в пять раз).

Форма изменения индукции в образце со временем имеет вид симметричных разнополярных почти прямоугольных импульсов. Для сравнения ниже изображено синусоидальное перемещающее поле и э. д. с., возникающая на вторичной обмотке при таком измерении индукции.

Простейшим типом интегратора является интегрирующая RC-цепочка (рис. 4). Для большинства типов интеграторов коэффициент передачи описывается выражением

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K}{\tau p + 1} \quad (5)$$

Здесь $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение;
 $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение;
 K — масштабный коэффициент интегратора;
 τ — постоянная времени интегратора;
 p — оператор производной по времени.

Для рассматриваемой RC-цепочки

$$K = 1; \quad \tau = RC.$$

При воздействии на вход цепочки напряжения $U_{\text{вх}}$ со вторичной обмотки образца, кроме процесса заряда интегрирующего конденсатора

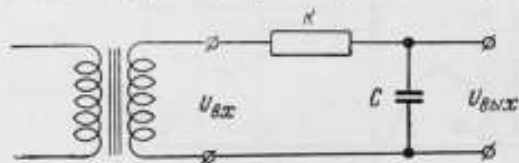


Рис. 4. Интегрирующая RC-цепочка.

во время импульсов, в паузах между ними будет происходить медленный разряд конденсатора через сопротивление R и включенное последовательно с ним внутреннее сопротивление источника сигнала (вторичную обмотку образца), которое в данном случае можно

считать равным нулю; поэтому напряжение на конденсаторе будет отличаться от выходного напряжения идеального интегратора и от формы изменения индукции в образце. Вершина импульса будет не горизонтальной, а наклонной (рис. 3).

Наибольшее отклонение от истинной кривой будет в конце импульса, где погрешность по индукции составит ΔB . Относительную ошибку $E_B = \frac{\Delta B}{B_{\text{max}}}$ определим из следующих соображений. После интегрирования короткого импульса э. д. с. со вторичной обмотки образца конденсатор C окажется заряженным до некоторого напряжения; по окончании импульса начнется разряд конденсатора по экспоненте

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{max}} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Разложив в ряд, имеем

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}} &= U_{\text{max}} \left(1 - \frac{t}{\tau} + \frac{t^2}{2\tau^2} - \dots \right) = \\ &= U_{\text{max}} - U_{\text{max}} \left(\frac{t}{\tau} - \frac{t^2}{2\tau^2} + \dots \right) \end{aligned}$$

Здесь первый член соответствует точному интегрированию, а второй член является отклонением выходного напряжения от постоянной величины. Он и представляет собой погрешность, если вместо t подставить длительность паузы между импульсами, равную половине периода на-

магнитизирующего поля $\frac{T}{2}$. Относительная погрешность $E_B = \frac{T}{2\tau}$ (при употребляющемся на практике отношении постоянной времени интегратора к периоду интегрируемого сигнала, составляющем величину порядка десятков и сотен, квадратичным и последующими членами можно пренебречь).

Итак, если производить выбор постоянной времени интегратора по заданной максимальной погрешности при определении индукции, то следует пользоваться выражением

$$\tau \geq \frac{T}{2\varepsilon_B} = \frac{50T}{\varepsilon_B} = \frac{50}{f\varepsilon_B},$$

где f — частота интегрируемого напряжения;
 T — его период;
 ε_B — в процентах.

Применение простых интегрирующих цепочек в качестве интеграторов на низких звуковых частотах нецелесообразно, так как для получения больших постоянных времени требуются большие значения емкостей и сопротивлений, а коэффициент передачи интегратора получается очень низким.

Применяются также электронные интеграторы с емкостной обратной связью (рис. 5). Коэффициент передачи такого интегратора имеет вид

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K}{(K+1)RCp + 1}.$$

Здесь K — коэффициент усиления усилителя без обратной связи.

Как видно из формулы, постоянная времени интегратора подобного типа равна $\tau = (K+1)RC$, т. е. при тех же величинах емкости и сопротивления, что и в простой интегрирующей цепочке, она в десятки и сотни раз больше, так как обратной связью может быть охвачено несколько каскадов.

При расчете величин емкости и сопротивления цепи обратной связи следует учесть следующее: увеличение сопротивления R приводит к возрастанию паразитных наводок на нем, в основном наводок с частотой сети, что особенно искажает измерения при перемагничивании образца той же частотой. Увеличение же величины емкости C обратной связи приводит к прохождению части непроинтегрированного входного напряжения прямо на выход интегратора.

Оптимальная величина сопротивления R лежит в пределах 5—20 ком. Величина конденсатора C рассчитывалась по требуемой постоянной времени.

На базе описанного интегратора в Институте металлокерамики и спечсплавов АН УССР построены установки для наблюдения петли гистерезиса ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса на частотах 50 гц и 10 кгц, причем на образцы наносятся лишь две одновитковые обмотки. В установке на 10 кгц эти витки выполнены в виде двух коаксиальных латунных трубок, к которым подводятся подвижные пружинящие контакты. Подобное устройство позволяет легко снимать и наживать измеряемые образцы.

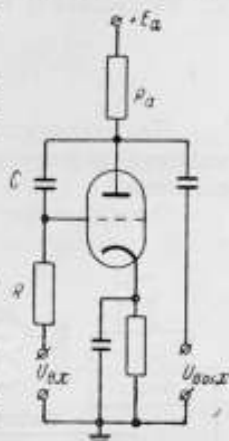


Рис. 5. Интегрирующий усилитель.

Импульсные измерения

Для ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса решающее значение имеют измерения импульсных параметров. Для этой цели в вышеуказанном институте применяются как стандартные импульсные генераторы (например типа 26И), так и специальные генераторы собственного изготовления.

Для проверки ферритов, применяющихся в запоминающих устройствах, собран стенд из трех генераторов типа 26И и специального смесителя импульсов, представляющего собой импульсный трансформатор, намотанный на линейном феррите с проницаемостью порядка 400—500. На три обмотки трансформатора подаются три сдвинутых во времени импульса с генераторов 26И (один из них работает в автоколебательном режиме, а два других — в режиме внешнего запуска от первого с задержкой на 15—20 мксек). На выходной обмотке получается пачка из трех импульсов с амплитудами до 1,5 а.

Для измерения времени перемагничивания ферритов создан генератор импульсов тока с крутым фронтом (до 0,05 мксек). Генератор может выдавать импульсы с амплитудой до 6—8 а.

Определение точки Кюри

Предлагаемый метод определения точки Кюри применим ко всем магнитным материалам и позволяет проводить измерения объектов массой менее 0,5 г.

Определение точки Кюри производится на автоматической установке, на выходе которой находится самопишущий потенциометр (на-



Рис. 6. Блок-схема установки для измерения точки Кюри.

пример ЭПП-09) или самопишущий мост с термометром сопротивления.

Основной частью установки (рис. 6) является воздушный трансформатор — микропечь с двумя вторичными обмотками, включенными встречно. Напряжение с вторичных обмоток поступает на усилитель (например 28-ИМ), после чего детектируется и подается на вход самопишущего потенциометра. Так как вторичные обмотки идентичны, то суммарная э.д.с. на входе усилителя без образца равна нулю.

Когда внутрь одной из обмоток помещен ферромагнитный образец, то уже при небольшом токе в первичной обмотке на потенциометре будет записано большое значение напряжения. При переходе через точку Кюри напряжение, записанное потенциометром, резко падает до нуля.

Первичная обмотка трансформатора служит одновременно и нагревателем. Сила тока в первичной обмотке регулируется при помощи авто-трансформатора, движок которого посредством шестеренчатой передачи связан с мотором Уоррена (СД-2). Шестерни подбираются таким образом, чтобы температура внутри воздушного трансформатора — микропечи повышалась со скоростью 5—8°С в минуту. При такой скорости подъема температуры образец и термометр или термометр сопротивле-

ния обладают одинаковой температурой. Контроль температуры производится также по амперметру, включенному в нагревательной обмотке. Обмотки трансформатора наматываются нихромовой проволокой на кварцевых или фарфоровых трубках.

Температура, измеренная термопарой (или термометром сопротивления), записывается на диаграмме самопишущего прибора.

При помощи n -точечного потенциометра можно одновременно производить измерение точки Кюри для $n/2$ образцов.

Градуировку вышеописанной установки можно провести по никелю, для которого точка Кюри $t_c = 348,2^\circ$.

Данная установка позволяет быстро и с достаточной технической точностью ($\pm 1\%$) определять температуру Кюри для малых образцов (от $0,1 \text{ см}^3$ и выше) как в компактном, так и в порошкообразном состоянии.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК В СТАТИЧЕСКОМ И КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ

В статье рассмотрен метод исследования тонких магнитных пленок в статическом режиме при помощи магнитных весов Вейсса, показаны приемы изучения свойств пленки на радиочастотах при помощи куметра, дана формула для определения потокоцепления пленки с измерительной катушкой.

В последние годы тонкие магнитные пленки толщиной в несколько тысяч ангстрем стали предметом интенсивного исследования. Это связано с их особыми магнитными свойствами, важными для теории ферромагнетизма, с их применением в качестве элементов вычислительных машин [1, 2].

Основная трудность исследования магнитных свойств тонких пленок состоит в том, что сцепленный с ними магнитный поток очень мал. Так, если пленка пермаллоя имеет типичные значения толщины 1000 \AA , ширины 1 см и индукции насыщения 1 вб/м^2 , сцепленный с ней поток равен $1 \times 10^{-9} \text{ вб}$ или $0,1 \text{ мкс}$. При использовании и исследовании пленок в импульсном режиме малая величина потока в известной мере компенсируется большой скоростью перемагничивания, так что в сигнальной обмотке появляется достаточная для индикации э. д. с. Однако изучение пленок не может быть ограничено только областью импульсных или высокочастотных полей, поскольку статические характеристики во многих отношениях представляют незаменимый материал для изучения физики магнитных явлений.

Многие методы исследования, обычные для массивных ферромагнетиков, к пленкам вообще неприменимы. В частности, определение индукции насыщения пленок с помощью баллистического гальванометра невозможно, так как баллистические гальванометры имеют недостаточную чувствительность.

В статических условиях возможно определение индукции насыщения пленок с помощью магнетометров. Имеется ряд чувствительных магнетометров сложной конструкции, пригодных для этой цели [3, 4]. В то же время количественное определение B_s пленок возможно с помощью сравнительно простой конструкции — магнитных весов Вейсса [5, 6, 7]. Их принцип действия состоит в том, что однородно намагниченный образец помещается в магнитное поле с заданной неоднородностью и

магнитный момент образца определяется по силе, действующей на него в неоднородном поле. Эту силу легко определить по отклонению подвесной системы, которая благодаря конструкции весов имеет только две степени свободы.

Особенность применения весов Вейсса для исследования пленок состоит, во-первых, в способе создания неоднородного поля и, во-вторых, в соответствующей расчетной формуле. Однородное поле, намагничивающее пленку до насыщения, следует прилагать параллельно ее плоскости. Неоднородное поле лучше всего создавать системой проводов с током, перпендикулярных плоскости пленки.

Если бесконечный провод с током направлен так, как показано на рис. 1, то сила, действующая на круглую пленку, определяется выражением

$$f = \frac{B_s i}{2} \cdot \frac{R^2}{l^2} \tau, \quad (1)$$

где B_s — индукция насыщения пленки;

i — ток в проводе;

τ — толщина пленки;

R — ее радиус;

l — расстояние от центра пленки до оси провода.

Эту формулу можно вывести следующим образом. Заменяем однородно намагниченную пленку эквивалентными связанными поверхностными токами [8]. Силовое взаимодействие с проводом отклоняющей системы имеют только токи, протекающие по цилиндрической поверхности пленки (нормально к плоскости чертежа). Согласно общему выражению для плотности эквивалентного поверхностного тока однородно намагниченного образца:

$$\vec{j} = [\vec{J} \cdot \vec{n}^0] \quad (2)$$

их плотность равна J . Сила, действующая со стороны тока отклоняющей системы на элементарный поверхностный ток, текущий по дуге da , равна

$$\mu_0 J \sin \alpha \cdot \tau \cdot i \cdot \frac{da}{2\pi a},$$

где d — расстояние от рассматриваемого элемента дуги до оси провода. Горизонтальная составляющая этой силы

$$df_x = \mu_0 J i \frac{\tau R}{2\pi a} \sin \alpha \cdot \cos \varphi \cdot da.$$

Сила, с которой ток действует на всю пленку,

$$f = f_x = \mu_0 J i \frac{R\tau}{2\pi} \cdot 2 \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos \varphi \cdot \sin \alpha}{a} \cdot da.$$

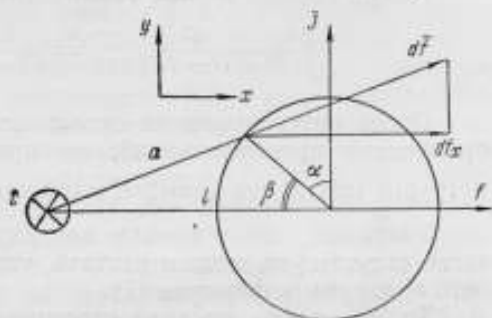


Рис. 1. Силовое взаимодействие однородно намагниченной пленки с одиночным проводом.

Заменяя в подынтегральном выражении функции углов α и φ на функции угла β , и переходя к интегрированию по $d\beta$, получаем определенный интеграл

$$\int_0^{\pi} \frac{(l - R \cos \beta) \cos \beta}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} d\beta. \quad (3)$$

Данный интеграл следует представить в виде суммы

$$l \int_0^{\pi} \frac{\cos \beta \cdot d\beta}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} - R \int_0^{\pi} \frac{\cos^2 \beta d\beta}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta}.$$

С подынтегральным выражением произведем тождественные преобразования:

$$\frac{\cos \beta}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} = \frac{1}{2Rl} \left(\frac{R^2 + l^2}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} - 1 \right);$$

$$\frac{\cos^2 \beta}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} = \frac{1}{4R^2 l^2} \left[\frac{(R^2 + l^2)^2}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} - 2Rl \cos \beta - (R^2 + l^2) \right].$$

Теперь воспользуемся табличным значением (Двайт, 446.2)

$$\int \frac{d\beta}{R^2 + l^2 - 2Rl \cos \beta} = \frac{2}{R^2 - l^2} \operatorname{arctg} \left| \frac{R+l}{R-l} \right| \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

После интегрирования остальных слагаемых и последующих алгебраических преобразований, не представляющих какого-либо труда, нетрудно найти, что при $l > R$ выражение (3) равно $\frac{\pi R}{2l^2}$.

Учитывая, что в тонких пленках размагничивающее поле практически отсутствует, можем считать, что в данном случае $\mu_0 J = B_S$, после чего приходим к формуле (1).

То, что длина провода ограничена, учитывается введением в формулу (1) множителя $\frac{l_1}{\sqrt{4l^2 + l_1^2}}$, где l_1 — длина провода. Эта поправка дает правильный результат, когда пленка расположена против середины провода, а l_1 в несколько раз больше чем l . При $l_1 > 20l$ поправочный множитель отличается от единицы менее чем на 0,0056.

Количественная оценка силы взаимодействия между проводом и пленкой дает величину $9 \cdot 10^{-6}$ г при $R = 5$ мм, $l = 5,3$ мм, $\tau = 2000$ Å, $B_S = 1$ вб/м². При длине подвеса 500 мм и суммарном весе подвесной системы 0,5 г эта сила дает отклонение $9 \cdot 10^{-3}$ мм.

Если применить систему проводов с током, что позволит увеличить отклонение по меньшей мере в 50 раз, и оптически усилить перемещение с помощью вращающегося зеркала в 200 раз, то получаем отклонение светового луча на 90 мм, достаточное для точного измерения.

Недостаток данной методики, присущий в большей или меньшей мере всем магнетометрам, состоит в зависимости чувствительности от веса образца, практически определяемого весом подложки, и в невозможности исследования пленок, нанесенных на массивные подложки. Другой недостаток, свойственный всем статическим методам исследования, состоит в том, что прибор реагирует, по существу, не на B_S , а на произ-

ведение $B_S \tau$, и определение B_S невозможно, если неизвестна толщина пленки. Проблема точного измерения толщины пленок без их разрушения, насколько можно судить по литературным данным, до сих пор окончательно не решена.

Отметим, что если исследуются пленки одного состава, полученные в одинаковых условиях, так что величину B_S можно считать постоянной, измерения по данной методике могут служить для определения толщины пленок.

Рассмотрим вопросы измерения магнитной проницаемости тонких магнитных пленок на радиочастотах.

Это можно сделать путем определения влияния пленки на комплексное сопротивление катушки, содержащей пленку в качестве сердечника. Задача определения магнитной проницаемости в этом случае состоит из двух частей: 1) определение изменений индуктивности ΔL и изменений активного сопротивления ΔR измерительной катушки, вызванных влиянием пленки, и 2) сопоставление ΔL и ΔR с действительной и мнимой частями проницаемости пленки.

Было установлено, что широко распространенный прибор — куметр типа КВ-1 при соблюдении определенных приемов обеспечивает чувствительность и точность измерений, достаточную для довольно широкого круга исследований пленок на радиочастотах. Естественно, точность измерений может быть повышена путем применения более точных измерительных приборов.

При исследовании тонких пленок имеется ряд особенностей по сравнению с обычными измерениями индуктивности на куметре.

Обычно при исследовании радиокатушек их устанавливают на верхней панели куметра, присоединяя непосредственно к клеммам прибора. Однако вокруг куметра существует сильное и неоднородное магнитное поле, обусловленное в основном постоянным магнитом вольтметра. На магнитное состояние пленки внешние магнитные поля оказывают большое влияние. Поэтому измерительная катушка с пленкой должна быть отнесена от прибора на расстояние не менее 1 м. Соединительные провода нужно выполнять в виде однородной линии, которую приходится рассматривать как линию с распределенными параметрами. Два медных провода без изоляции, скрепленные на расстоянии 10—15 мм друг от друга шайбами из высокочастотного диэлектрика, в данном случае предпочтительнее коаксиального кабеля из-за большей добротности.

Другая особенность измерений состоит в том, что изменение индуктивности катушки в общем случае очень мало (несколько процентов от величины индуктивности). Измерение малых изменений индуктивности вообще, а при соединении катушки с прибором посредством линии с распределенными параметрами в частности, требует применения специальной методики.

Расчетная формула для определения малого изменения индуктивности катушки, соединенной с куметром посредством линии с распределенными параметрами, имеет вид:

$$\Delta L = \frac{1}{\omega^2 C_{x,z}} \cdot \frac{C_{x,z} + C_{x,x}}{(C_{вх,о} + C_{x,x})^2} \cdot \frac{\Delta C_{вх}}{1 - \frac{\Delta C_{вх}}{C_{вх,о} + C_{x,x}}}$$

где $C_{x,z}$ — емкость, резонирующая с линией в режиме короткого замыкания при данной частоте;

$C_{x,x}$ — емкость холостого хода линии при частоте измерения;

$C_{вх,о}$ — емкость, резонирующая с линией, нагруженной на исследуемую катушку до того, как произошло изменение ее индуктивности;

$\Delta C_{\text{вх}}$ — изменение емкости, необходимое для получения резонанса после изменения индуктивности.

Будем пользоваться также величиной $C_{\text{вх}} = C_{\text{вх.о}} + \Delta C_{\text{вх}}$.

Эта формула справедлива, когда длина линии меньше четверти длины волны в ней при данной частоте и когда добротности

$$Q_{\text{к.з}} Q_{\text{х.х}} Q_{\text{вх.о}} Q_{\text{вх}} > 10.$$

Изменение активного сопротивления катушки в общем случае можно определить по формуле

$$Z = R + j\omega L = \frac{j + \frac{1}{Q_{\text{х.х}}}}{\omega C_{\text{к.з}}} \cdot \frac{C_{\text{к.з}} - C_{\text{вх}} + j\left(\frac{C_{\text{к.з}}}{Q_{\text{вх}}} - \frac{C_{\text{вх}}}{Q_{\text{к.з}}}\right)}{C_{\text{вх}} + C_{\text{х.х}} + j\left(\frac{C_{\text{х.х}}}{Q_{\text{вх}}} - \frac{C_{\text{вх}}}{Q_{\text{х.х}}}\right)}$$

Применяя ее один раз к катушке с пленкой, а другой раз к катушке без пленки, можно определить изменение активного сопротивления, вызванное только потерями в пленке. Неудобство этой формулы состоит в ее сложности. Если, как это имеет место при исследовании пленок, сравнительно малые изменения индуктивности сопровождаются большими изменениями добротности, то можно получить более простую расчетную формулу

$$\Delta R = B \cdot C_{\text{вх}} \frac{Q_{\text{вх.о}} - Q_{\text{вх}}}{Q_{\text{вх.о}} \cdot Q_{\text{вх}}},$$

где

$$B = \frac{C_{\text{х.х}} + C_{\text{к.з}}}{\omega_{\text{к.з}} (C_{\text{вх.о}} + C_{\text{х.х}})^2},$$

причем коэффициент B не зависит от свойств пленки.

Наилучшая форма пленки для данных измерений — круг, вписанный в квадратную подложку. Длина катушки должна равняться длине образца. При этом относительное изменение индуктивности катушки под влиянием пленки будет максимальным. Катушку следует мотать в один слой вплотную, непосредственно на подложку с пленкой или на плоский каркас, в который образец будет вставлен с минимальным зазором.

Число витков и диаметр провода должны подбираться экспериментально, с учетом того, что с увеличением числа витков при фиксированной длине катушки ее индуктивность растет, а добротность может как увеличиваться, так и уменьшаться. Диаметр провода может меняться в пределах 0,2—0,5 мм. При частотах ниже 2 Мгц лицендрат 10×0,05 обеспечивает лучшую добротность катушки, чем одножильный провод. Если частота собственного резонанса измерительной катушки превышает частоту измерения менее чем в 10 раз, следует учитывать распределенную емкость катушки.

Наибольшая точность измерений получается при частотах 0,4—4 Мгц. При более низкой частоте уменьшается добротность измерительной катушки. При более высокой частоте может проявиться влияние паразитных емкостных связей.

Возможность выбора частоты, оптимальной с точки зрения проведения измерений, связана с тем, что в данном диапазоне нет оснований ждать зависимости свойств пленок от частоты. Вихревые токи в пленках практически отсутствуют до частот 10^9 — 10^{10} гц, а частота их собственного ферромагнитного резонанса достаточно высока — порядка 10^8 гц.

Сечение измерительной катушки представляет прямоугольник с большим отношением длин сторон. Добротность катушек такой формы невысока и при частоте порядка 1 Мгц не превышает 50. Встроенный вольтметр куметра не позволяет измерять столь малые добротности; поэтому напряжение на конденсаторе резонансного контура следует измерять внешним чувствительным электронным вольтметром, как это обычно делается при малой добротности [9]. Связь между показанием вольтметра при резонансе и добротностью контура легко найти по ширине резонансной кривой по методу вариации емкости [10]. Такой способ снимает одно из возражений против применения куметра при точных измерениях — большую погрешность в определении добротности. Комплексное входное сопротивление вольтметра должно учитываться при обработке результатов измерений.

При добротности ниже 50 резонансная кривая недостаточно крута для точного определения резонансной емкости непосредственно по максимуму напряжения на конденсаторе. Кроме того, становится заметно, что максимальное напряжение на конденсаторе имеет место не при резонансе. Нужно определять емкости C_1 и C_2 , при которых напряжение на конденсаторе по обе стороны максимума имеет одинаковую величину. Резонансная емкость

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2} \left(1 + \frac{1}{Q_{\text{вх}}^2} \right).$$

Недостаток измерений с помощью куметра типа КВ-1, существенный при измерении пленок, состоит в том, что измерительный ток относительно велик и может влиять на магнитное состояние образца. Для оценки его влияния на пленку будем считать, что напряженность поля, созданного этим током внутри измерительной катушки,

$$H_n = \eta_1 i_n \omega_0,$$

где i_n — ток в измерительной катушке;

ω_0 — число ее витков на единицу длины;

η_1 — коэффициент, учитывающий уменьшение поля в катушке ограниченной длины по сравнению с полем бесконечно длинной катушки.

У катушек, изготовленных в соответствии с изложенными выше соображениями, $\eta_1 = 0,7 \div 0,9$.

Согласно расчету на основе теории длинных линий напряженность поля измерительного тока внутри катушки

$$H_{n \text{ max}} = 1,8 \eta_1 \omega_0 U \left(\omega C_{\text{вх}} - \frac{\sin al}{Z_c} \right),$$

где $H_{n \text{ max}}$ — максимальное значение напряженности поля;

U — действующее значение напряжения в начале линии (показание вольтметра);

Z_c и al — параметры линии, подлежащие определению из опытов короткого замыкания и холостого хода линии.

При «множителе Q », равном 1, и частотах 0,4—4 Мгц это поле может достигать нескольких десятых эрстеда.

Рассмотрим, каким образом изменения активного сопротивления и индуктивности измерительной катушки, вызванные влиянием пленки, можно связать с магнитными параметрами пленки.

Если поле измерительной катушки считать однородным, что теоретически осуществляется только в катушках бесконечно длинных или специальной формы, то потокосцепление однородно намагниченного ферромагнитного образца с катушкой определяется соотношением:

$$\Psi = \mu_0 \cdot J \cdot V \cdot \omega_0, \quad (4)$$

где V — объем образца;

ω_0 — число витков катушки на единицу длины;

J — намагниченность образца.

Если направления поля измерительной катушки и намагниченности образца различны, то в формулу (4) входит проекция вектора намагниченности на направление этого поля J_n .

Выведем формулу (4) для частного случая плоской цилиндрической пленки, с образующей, перпендикулярной ее плоскости и имеющей толщину τ и площадь в плане S . «Прямое» решение задачи путем расчета потокосцепления однородно намагниченной пленки с катушкой приводит

к чрезвычайно сложным математическим выкладкам. Несравненно проще «обратное» решение с помощью так называемого принципа взаимности [8], поэтому

1) введем в рассмотрение вместо пленки эквивалентную ей катушку с соответствующим законом распределения ампервитков;

2) рассчитаем взаимную индуктивность между этой фиктивной и измерительной катушкой, вычислив потокосцепление однородного поля измерительной катушки с фиктивной,

3) потокосцепление поля эквивалентной катушки (пленки) с измерительной катушкой определим по принципу взаимности.

Пусть направление поля измерительной катушки совпадает с положительным направлением оси y (рис. 2). Рассмотрим элемент пленки, отсекаемый двумя плоскостями, перпендикулярными оси y и отстоящими друг от друга на расстоянии dy .

Рис. 2. Схема, поясняющая расчет эквивалентного поверхностного тока однородно намагниченной пленки.

Пусть внешние нормали к торцевым поверхностям этого элемента образуют с полем H_n углы φ_1 и φ_2 .

Согласно выражению (2) плотность поверхностного тока на плоских поверхностях пленки $\delta = J$, а на участках l_1 и l_2 $\delta_s = J \sin \varphi_1$ и $J \sin \varphi_2$ соответственно. Так как длины этих участков $l_1 = \frac{dy}{\sin \varphi_1}$ и $l_2 = \frac{dy}{\sin \varphi_2}$, величина поверхностного тока, текущего по ним нормально к плоскости чертежа, одинакова и равна $J dy$; поэтому однородно намагниченную пленку можно заменить эквивалентной катушкой такой же формы, имеющей постоянную плотность ампервитков, причем

$$i_s \cdot \omega_s = \delta = J. \quad (5)$$

Рассчитаем потокосцепление этой катушки с однородным полем измерительной катушки. Пусть напряженность этого поля равна H_n . По-

токосцепление элементарного участка фиктивной катушки с этим полем

$$d\Psi_{\text{эл}} = \mu_0 H_n \cdot p \cdot \tau \cdot \omega_s \cdot dy,$$

где p — ширина элементарного участка катушки.

Общее потокоосцепление фиктивной катушки с внешним полем

$$\Psi = \mu_0 \cdot H_n \tau \cdot \omega_s \cdot \int p dy,$$

где интеграл берется по всей длине фиктивной катушки (пленки).

Этот интеграл есть площадь пленки в плане. Следовательно,

$$\Psi = \mu_0 H_n \omega_s \tau \cdot S.$$

Напряженность поля бесконечно длинной измерительной катушки $H_n = i_n \cdot \omega_0$; поэтому

$$\Psi = \mu_0 i_n \omega_0 \omega_s \cdot \tau \cdot S = i_n \cdot M_{\text{эл}},$$

где

$$M_{\text{эл}} = \mu_0 \omega_0 \omega_s \cdot \tau \cdot S$$

взаимная индуктивность фиктивной и измерительной катушек.

Согласно принципу взаимности $M_{\text{эл}} = M_{\text{из}}$ поэтому потокоосцепление измерительной катушки с фиктивной при протекании в последней тока i_s ,

$$\Psi = i_s M_{\text{эл}} = \mu_0 i_s \omega_s \omega_0 \tau \cdot S.$$

Подставляя значения из формулы (5), получаем совпадение с формулой (4).

В действительности измерительная катушка имеет ограниченную длину, причем воздушный зазор между пленкой и катушкой во много раз больше толщины пленки; при этом поле измерительной катушки неоднородно по величине и по направлению, а часть магнитного потока, сцепленного с пленкой, замыкается по воздушному зазору, не пересекая витков измерительной катушки.

Поле внутри измерительной катушки прямоугольной формы рассчитано в ряде работ [11, 12]. В катушках, у которых толщина много меньше остальных размеров, неоднородность поля внутри вписанного круга незначительна.

Будем считать, что потокоосцепление пленки с катушкой ограниченной длины

$$\Psi = \eta_2 \mu_0 J_0 \omega_0 S \cdot \tau, \quad (6)$$

где коэффициент $\eta_2 < 1$ и введен потому, что часть потока, сцепленного с пленкой, не пересекает витков катушки.

Расчет коэффициента η_2 представляет самостоятельную сложную задачу и выходит за рамки настоящей работы. Покажем только, что и здесь применение принципа взаимности может значительно упростить решение. В качестве примера рассчитаем коэффициент η_2 для случая одиночного бесконечно длинного витка, лежащего в диаметральной плоскости тонкой пленки (рис. 3).

Согласно закону полного тока Z — составляющая индукции витка в плоскости пленки

$$B_z = \mu_0 i \frac{d}{z(d^2 + z^2)}.$$

Потокоосцепление поля витка с элементарным участком катушки, эквивалентной пленке,

$$d\Psi = \tau \cdot \omega_s \cdot 2R \cos \alpha \cdot B_z \cdot dz.$$

Потокосцепление витка со всей пленкой

$$\Psi = \frac{\mu_0 i d \cdot \tau \cdot w_s \cdot 4}{\pi} \int_0^R \frac{R \cos \alpha}{d^2 + Z^2} dz.$$

С учетом очевидного из геометрических соображений равенства $z = R \sin \alpha$ и после соответствующей замены переменной интеграл приводится к виду

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{R^2 \cos^2 \alpha \cdot d\alpha}{d^2 + R^2 \sin^2 \alpha} = \frac{\pi}{2} \left[\frac{\sqrt{d^2 + R^2}}{d} - 1 \right]. \quad (7)$$

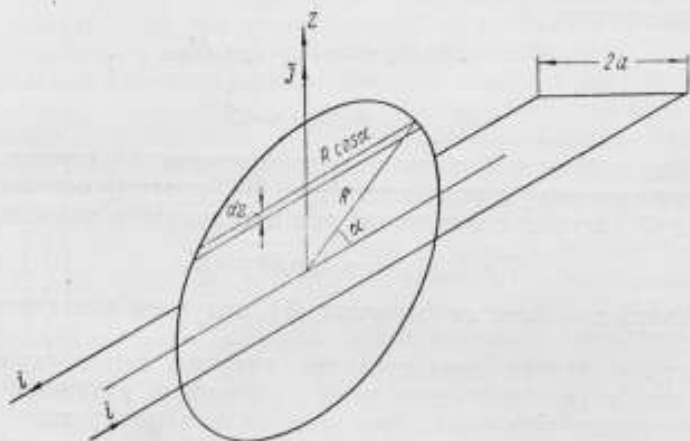


Рис. 3. Схема для расчета потокосцепления однородно намагниченной пленки с одиночным витком.

Выражение в левой части этого равенства (произведя в нем замену $\cos^2 \alpha = 1 - \sin^2 \alpha$) приводим к виду

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{R^2 + d^2 - (d^2 + R^2 \sin^2 \alpha)}{d^2 + R^2 \sin^2 \alpha} d\alpha = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{(R^2 + d^2) d\alpha}{d^2 + R^2 \sin^2 \alpha} - \frac{\pi}{2}.$$

Для получения формулы (7) используем табличное значение (Двайт, 436.5) интеграла

$$\int \frac{d\alpha}{d^2 + R^2 \sin^2 \alpha} = \frac{1}{d \sqrt{d^2 + R^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{d^2 + R^2}}{d} \operatorname{tg} \alpha.$$

после чего получим

$$\Psi = 2\mu_0 i \tau w_s [\sqrt{d^2 + R^2} - d].$$

На основании принципа взаимности потокосцепление однородно намагниченной пленки с одиночным витком

$$\Psi = 2\mu_0 J \tau (\sqrt{d^2 + R^2} - d).$$

Если $\tau \ll R$, то при $d \rightarrow \frac{\tau}{2}$ получаем потокосцепление пленки с витком, лежащим непосредственно на ее поверхности (по диаметру):

$$\Psi_0 = 2\mu_0 J \tau R.$$

В этом случае

$$\eta_2 = \frac{\Psi}{\Psi_0} = \frac{1}{R} (\sqrt{d^2 + R^2} - d).$$

Это выражение было получено ранее Кобелевым [13] путем прямого интегрирования поля однородно намагниченной пленки.

Обратимую восприимчивость пленки в направлении пробного поля можно рассматривать как отношение приращения проекции вектора намагниченности на направление внешнего поля к приращению этого поля

$$\chi = \frac{\Delta J_n}{\Delta H_n}.$$

С учетом (2) и (6) приращение обратимой индуктивности, обусловленное влиянием пленки

$$\Delta L = \frac{\Delta \Psi}{\Delta H_n} = \mu_0 \cdot \omega_0 \tau \cdot S \cdot \omega_0 \frac{\Delta J_n}{\Delta H_n} \cdot \eta_2 \cdot \eta_1 = \eta \mu_0 \omega_0^2 \tau S,$$

где

$$\eta = \eta_1 \eta_2.$$

В высокопроницаемых пленках можно пренебречь разницей между восприимчивостью и проницаемостью, после чего

$$\Delta L = \eta \mu_0 \mu \omega_0^2 \tau S.$$

Оценим возможное изменение индуктивности катушки под влиянием пленки. Пусть у пленки $R=1$ см, $\tau=1000$ Å, $\mu=5000$, а катушка имеет $\omega_0=25$ витков/см. Тогда при $\eta=1$ получаем $\Delta L=1,25$ мкГн.

Квадратная в плане катушка со стороной 2 см при ширине зазора 1,5 мм и $\omega_0=25$ витков/см имеет индуктивность 10—15 мкГн. Поэтому изменение индуктивности катушки под влиянием пленки составит около 10%.

В случае комплексной магнитной проницаемости имеем дело с комплексной индуктивностью

$$\tilde{L} = \eta \mu_0 \mu \omega_0^2 \cdot S \cdot \tau = \eta \mu_0 (\mu_1 - j\mu_2) \omega_0^2 \cdot S \cdot \tau,$$

которая следующим образом связана с эквивалентной последовательной индуктивностью и сопротивлением катушки:

$$\tilde{L} = L - j \frac{R}{\omega},$$

где ω — круговая частота измерительного тока.

Отсюда получаем формулы для расчета μ_1 и μ_2 :

$$\mu_1 = \frac{\Delta L}{\eta \mu_0 \omega_0^2 \tau S}; \quad \mu_2 = \frac{\Delta R}{\eta \mu_0 \cdot \omega \cdot \omega_0^2 \cdot \tau \cdot S}.$$

Несмотря на принципиальную возможность определения коэффициента η расчетным путем, его лучше определять экспериментально с помощью эталонного образца. Этот коэффициент зависит от размеров и формы пленки в плане и от размеров катушки; поэтому при измерении пленок, имеющих в плане фиксированные размеры, число витков и площадь образца следует включить в этот коэффициент. В него можно включить и постоянную величину μ_0 . От толщины пленки этот коэффициент не зависит. Теперь получаем простые формулы связи между ΔL , ΔR и параметрами пленок данной формы:

$$\mu_1 = \beta \frac{\Delta L}{\tau}; \quad \mu_2 = \frac{\beta}{\omega} \cdot \frac{\Delta R}{\tau},$$

где коэффициент β подлежит определению с помощью эталонного образца.

Наряду с абсолютной величиной μ_1 и μ_2 интересен ход кривых μ_1 и μ_2 в функции подмагничивающего поля (H_0). Эти кривые с точностью до масштабного множителя можно строить, не зная величины β . Целеобразно строить зависимости $\frac{\mu_1}{\mu_{1H}} = f(H_0)$ и $\frac{\mu_2}{\mu_{2H}} = f(H_0)$,

где μ_{1H} — значение действительной части проницаемости пленки при отсутствии подмагничивания.

Расчетные формулы для построения этих зависимостей при измерениях на куметре получаем следующим образом.

Пусть ΔL_H — изменение индуктивности пробной катушки при измерении начальной проницаемости, $\Delta C_{вх.н}$ — соответствующее изменение резонансной емкости. Тогда

$$\frac{\mu_1}{\mu_{1H}} = \frac{\Delta L}{\Delta L_H} = \frac{\Delta C_{вх.н}}{\Delta C_{вх.н}} \cdot \frac{C_{вх.о} + C_{х.х} - \Delta C_{вх.н}}{C_{вх.о} + C_{х.х} - \Delta C_{вх.н}};$$

$$\frac{\mu_2}{\mu_{2H}} = \frac{C_{вх}}{\Delta C_H} \left(1 - \frac{\Delta C_H}{C_{вх.н} + C_{х.х}} \right) \cdot \frac{Q_{вх.о} - Q_{вх}}{Q_{вх.о} Q_{вх}}.$$

Если $\Delta C_{вх.н}$ и $\Delta C_{вх}$ много меньше, чем $C_{вх.о} + C_{х.х}$, эти формулы упрощаются:

$$\frac{\mu_1}{\mu_{1H}} = \frac{\Delta C_{вх}}{\Delta C_H}; \quad \frac{\mu_2}{\mu_{2H}} = \frac{C_{вх}}{\Delta C_H} \cdot \frac{Q_{вх.о} - Q_{вх}}{Q_{вх.о} Q_{вх}}.$$

В настоящей работе:

1) показано, что сравнительно простой магнитометр — магнитные весы Вейсса можно применить для определения индукции насыщения пленок в статических условиях; предложена расчетная формула и дана оценка чувствительности магнитометра;

2) рассмотрены приемы, с помощью которых можно измерять изменение комплексного сопротивления катушки, обусловленное влиянием пленки, при измерениях на куметре в диапазоне 0,4–4 МГц;

3) получена формула для определения потокосцепления пленки с измерительной катушкой (для случая однородного поля измерительной катушки);

4) установлена связь между результатами измерения влияния пленки на комплексное сопротивление катушки и относительными изменениями действительной и мнимой частей проницаемости пленки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поливанов К. М., Фрумкин А. Л., Изв. АН СССР, Сер. физ., 25, 566, 1961.
2. Moore A., Trans. of IRE, CP-7, 3, 1960.
3. Neugebauer C. A., Phys. Rev. 116, 1441, 1959.
4. Брандт Н. В., ПТЭ, № 4, 153, 1959.
5. Weiss P., Foex C. J. Phys. Radium. I. 274, 1917.
6. Дорфман Я. Г., Магнитные свойства и строение вещества, ГИТТЛ, 1955.
7. Бозорт Р., Ферромагнетизм, ИЛ, 1956.
8. Нетушил А. В., Поливанов К. М., Теоретические основы электротехники, ч. 3, ГЭИ, 1956.
9. Нетушил А. В., Жуховицкий Б. Я., Кудин В. Н., Парини Е. П., Высоочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников, ГЭИ, 1959.
10. Ремез Г. А., Курс основных радиотехнических измерений, Связьиздат, 1955.
11. Пеккер И. И., «Известия вузов СССР», Серия «Электромеханика», № 6, 19, 1958.
12. Бирюков В. А., Данилов В. И., ЖТФ, 31, 428, 1961.
13. Кобелев В. В., Установка для осциллографирования петель гистерезиса плоских ферромагнитных пленок, ИТМ и ВТ АН СССР, 1960.

В. В. КОБЕЛЕВ

АППАРАТУРА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ПЕТЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА МАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ВЕСЬМА МАЛЫМ ОСТАТОЧНЫМ ПОТОКОМ

В статье описана высококачественная установка, позволяющая наблюдать на экране электронного осциллографа петли гистерезиса весьма малых ферритовых образцов и пленочных элементов.

Во многих случаях оказывается необходимым снимать петлю гистерезиса с магнитных элементов с малым поперечным сечением, а следовательно, и малым магнитным потоком. Например, в запоминающих устройствах вычислительных машин широко используются ферритовые сердечники с внешним диаметром 2 мм, что соответствует остаточному потоку 5 мкс. Наблюдается дальнейшая тенденция к уменьшению размеров. Сердечники диаметром 1 мм и остаточным потоком 2 мкс находятся уже в стадии массового внедрения.

Магнитные потоки ферромагнитных пленок, которые, по-видимому, будут в ближайшем будущем широко применяться в технике дискретного счета, еще меньше и в типичных случаях лежат в диапазоне 0,1—0,01 мкс.

Снятие петли гистерезиса на существующей аппаратуре с объектов столь малого поперечного сечения связано со значительными трудностями.

Установки для снятия петли гистерезиса с помощью баллистического гальванометра имеют постоянную порядка 100 мкс/мм [1]. Желая получить при исследовании ферритового сердечника с остаточным потоком 5 мкс отклонения порядка 100 мм, приходим к необходимости намотать на него 1000 витков; поэтому петля гистерезиса снимается обычно не с одного сердечника, а с 20—30, предположительно однотипных. Даже и в этом случае приходится наматывать 50—100 витков, что является очень трудоемкой операцией. Кроме того, намотка большого числа витков вызывает большие напряжения в сердечнике, что может исказить его петлю гистерезиса.

Постоянная установка для снятия петли гистерезиса с индикацией на экране осциллографа несколько выше и составляет примерно 50 мкс/мм [1]. И в этом случае приходится наматывать на сердечник значительное число витков. В осциллографических установках (при работе их от сети), имеющих постоянную порядка 50 мкс/мм и не исполь-

зующих особых мер для устранения помех, уже заметны дрожания петли гистерезиса, затрудняющие фотографирование.

Для того чтобы иметь возможность наблюдать на экране осциллографа петлю гистерезиса с тороидальных ферромагнитных элементов с потоками порядка нескольких максвелл, снимая при этом сигнал с одного витка, необходимо повысить чувствительность осциллографической установки на два порядка. Это легко можно сделать, увеличив рабочую частоту до 10—20 кГц, однако, при такой частоте начинают сказываться процессы магнитной вязкости и петля гистерезиса значительно расширяется. Для правильного выбора рабочей частоты необходимо знать величину этого эффекта.

Если предположить, что скорость изменения потока в магнитном элементе зависит только от превышения напряженности поля над коэрцитивной силой, то можно показать [2], что расширение петли гистерезиса ΔH равно:

$$\Delta H = \sqrt{2\pi f H_0 S} \sqrt{1 - \left(\frac{H_c}{H_0}\right)^2}, \quad (1)$$

где f — частота перемагничивающего поля, гц;

H_0 — амплитуда магнитного поля, э;

H_c — коэрцитивная сила сердечника, э;

S — постоянная, характеризующая материал; $S = (H - H_c)\tau$; здесь τ — время перемагничивания; $H = H_0 \sin 2\pi ft$.

Рассмотрим в качестве примера случай типичного ферритового сердечника $H_c = 1$ э; $H_0 = 3$ э; $S = 0,6 \cdot 10^{-6}$ э.сек.

Подставляя эти величины в формулу (1), получаем для 100 гц $\Delta H = 0,032$ э, для 1 кГц $\Delta H = 0,11$ э и 0,32 э для 10 кГц. Полагая, что основная масса образцов обладает быстродействием, близким к быстродействию ферритовых запоминающих сердечников или выше, в качестве рабочей частоты была выбрана частота в 1 кГц, поскольку расширение петли в этом случае составляет еще достаточно малую долю от коэрцитивной силы. Из приведенной формулы следует также, что для элементов, коэрцитивная сила которых очень мала, рабочая частота 1 кГц является чрезмерно высокой, и расширение петли гистерезиса обязательно нужно учитывать даже на частотах порядка 100 гц.

При перемагничивании ферромагнитного элемента возникает сигнал, пропорциональный производной от магнитного потока. Ввиду малости, последний сигнал должен быть подан на усилитель, коэффициент усиления которого необходимо иметь большим. Поскольку петля гистерезиса представляет собой зависимость потока в элементе от приложенного поля, усилитель обязательно должен быть интегрирующим.

Оценим величину необходимого коэффициента усиления применительно к сердечнику с остаточным потоком 5 мкс и снятием сигнала с одного витка. Для упрощения оценок будем считать, что исследуемый сердечник имеет петлю гистерезиса, близкую к идеально прямоугольной. Поскольку интегрирующий усилитель имеет в целом частотную характеристику, обратную пропорциональную частоте, целесообразно разделить операции интегрирования и усиления и рассматривать их отдельно. Пусть сигнал с выходной обмотки сердечника подается непосредственно на интегрирующую RC-цепочку. Характер сигнала на входе RC-цепочки и на емкости показан на рис. 1. В то время как сигналы на входе имеют характер сравнительно узких импульсов, напряжение на емкости сходно с прямоугольными импульсами.

Амплитуда прямоугольных импульсов напряжения зависит только от перепада потокосцепления на входе усилителя. Действительно,

$$\Delta U = \int \frac{1}{C} i dt = \int \frac{e}{RC} dt = \frac{\Delta \psi}{RC} \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

где $\Delta \psi$ — изменение потокосцепления на входе усилителя, мкс.

Из-за конечной величины постоянной времени RC -цепочки к моменту прихода следующего импульса напряжение на емкости успевает несколько снизиться. Это приводит к характерному искажению петли гистерезиса (рис. 2). Будем считать допустимым искажение петли на 5%, т. е. на ширину линии (1 мм) при размере половины петли 20 мм.

Иначе говоря, $RC = 20\Delta t$, где Δt — половина периода возбуждающего тока. В нашем случае $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ сек, что дает $RC = 10^{-2}$ сек. Подставляя значения в формулу (2), получим

$$\Delta U = \frac{10 \cdot 10^{-8}}{10^{-2}} = 10 \text{ мкв.} \quad (3)$$

При чувствительности осциллографа (по пластинам) 0,5 мм/в и полном размахе петли гистерезиса 40 мм требуемый общий коэффициент усиления равен примерно $8 \cdot 10^6$. Усилители со столь большим коэффициентом усиления невозможно выполнить в одном блоке, так как

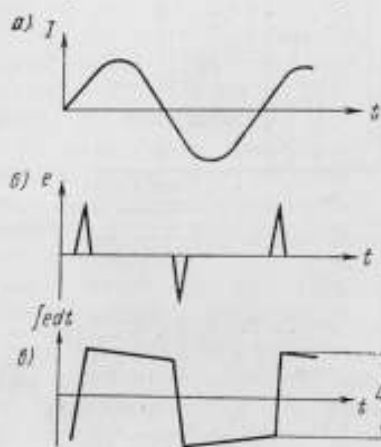


Рис. 1. Осциллограммы сигналов: а — перемагничивающего поля; б — на входе интегрирующего каскада; в — на выходе интегрирующей цепочки.

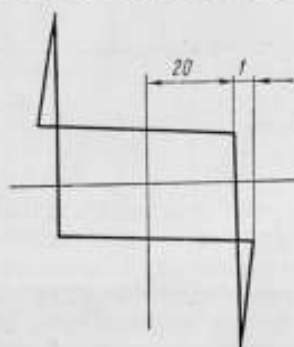


Рис. 2. Искажение петли гистерезиса при малой постоянной времени интегрирования.

неизбежно возникает генерация из-за различного рода обратных связей.

В созданном в Институте точной механики и вычислительной техники приборе для наблюдения петель гистерезиса малых ферритовых сердечников со съемом сигнала с одного выходного витка усилитель разбит на три блока с автономным питанием.

Второй трудностью является подавление собственных низкочастотных шумов усилителя и сетевых наводок. Высокочастотные шумы, хотя и обнаруживаются при максимальном усилении, все же невелики, так как интегрирование делает особенно заметными низкие частоты.

Первый блок интегрирующего усилителя (рис. 3) состоит из трех каскадов с коэффициентом усиления около восьми на каскад (один из каскадов является интегрирующим) и катодного повторителя. Первый каскад усилителя и каскад катодного повторителя имеют развязки по анодному питанию. Сопровождающие автоматического смещения не шунти-

руются емкостями с тем, чтобы создать более равномерную характеристику по низким частотам и за счет отрицательной обратной связи уменьшить влияние медленных изменений крутизны ламп при их старении. Интегрирующая цепочка расположена не на входе, а в анодной цепи второго каскада усиления, так как такое расположение благоприятно влияет на устойчивость блока, поскольку интегрирующий каскад поворачивает фазу на 90° и генерация усилителя затрудняется. Постоянная времени интегрирующей цепочки равна 10^{-3} , а не 10^{-2} , как это упоминалось выше. Уменьшение постоянной времени в 10 раз, без потери в амплитуде сигнала, достигается за счет корректирующего каскада с коэффициентом усиления около 10, расположенного вне основной линии усилителя. Это, естественно, эквивалентно увеличению постоянной времени в 10 раз и одновременному введению дополнительного каскада усиления. Метод, приведенный в данном случае и являющийся новым,

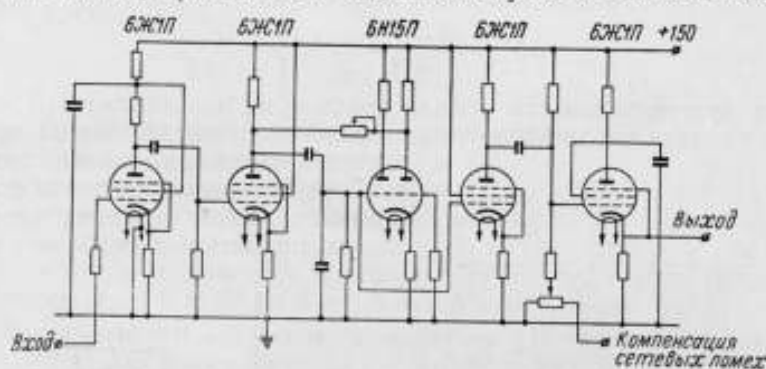


Рис. 3. Принципиальная схема первого блока интегрирующего усилителя.

по-видимому, предпочтительнее других, описанных ранее [1, 3], поскольку количество последовательно включенных каскадов уменьшается.

В то время как обычно дополнительное усиление увеличивает эффективную величину интегрирующей емкости [3], в описываемой схеме увеличивается эффективное сопротивление, через которое разряжается интегрирующая емкость.

Меняя связь между интегрирующим и корректирующим каскадами, можно регулировать постоянную времени схемы или, иначе говоря, «фазу» по каналу вертикального усиления. Питание блока осуществляется по цепям накала ламп от батарей аккумуляторов, а по цепям анода от $+300$ в через стабилизатор. Стабилизатор с коэффициентом стабилизации по постоянному напряжению около 100 и по переменному напряжению около 1000 подает напряжение $+150$ в на все каскады первого блока усилителя. Во входную цепь каскада катодного повторителя вводится внешнее напряжение с частотой 50 гц и регулируемой фазой, компенсирующее сетевые наводки, проникающие в усилитель, несмотря на все усилия. Введение этого напряжения, хотя и улучшает несколько работу прибора, однако не является обязательным.

Второй блок усилителя (рис. 4) состоит из двух каскадов усиления, сходных с применяемыми в первом блоке и каскаде катодного повторителя. Второй блок усиления охвачен сильной отрицательной обратной связью по низким частотам. Двухзвенный фильтр хорошо пропускает низкие частоты, но задерживает частоты, начиная примерно с 500 гц. Величина отрицательной обратной связи регулируется сопротивлением, включенным потенциометрически, начиная от нуля. Чрез-

мерно сильную обратную связь вводить не рекомендуется, так как при этом несколько искажается форма петли гистерезиса. Анодное питание блока стабилизировано устройством, аналогичным применяемому в первом блоке. Накал ламп производится от накаливающего трансформатора.

Третий блок усилителя представляет собой усилитель вертикального отклонения осциллографа типа ИО-4.

Измерение коэрцитивной силы произвести нетрудно, так как известна амплитуда намагничивающего тока.

Труднее определить масштаб по вертикальной оси. Целесообразно при этом пользоваться нормальным образцом.

Получить нормальные образцы с точно известным остаточным потоком можно следующим образом: на установке с баллистическим гальванометром определяются максимальный и остаточный потоки 15—20 сердечников, сложенных вместе. Затем на описываемой осциллографической установке измеряются непосредственно по отклонению луча на экране остаточные и максимальные индукции (в миллиметрах) каждого сердечника в отдельности. Поскольку известна сумма магнитных потоков всех сердечников, нетрудно определить магнитные потоки каждого отдельного сердечника.

Естественно, что при этом нельзя определить остаточный поток каждого сердечника точнее, чем это позволяет сделать измерение на экране осциллографа, т. е. примерно 75%, в то время как баллистическая установка дает гораздо более точное значение суммарного потока всех сердечников.

Для уточнения значений потоков отдельных сердечников можно воспользоваться следующим методом. Подберем добавочный сердечник с потоком примерно равным среднему потоку в измеренной партии и включим его последовательно в противофазе с каждым из сердечников измеряемости группы. Если сердечники примерно однотипны, то разностный поток не превосходит 10% от величины потока сердечника. Уложив на все сердечники по десять витков вместо прежнего одного, оказывается возможным точно измерить разностные потоки, а следовательно, и уточнить значения потоков каждого отдельного сердечника, снизив ошибку с 5 до 0,5%.

При тщательно проведенных измерениях описанным выше способом можно определить максимальный и остаточный потоки сердечника с погрешностью не больше $\pm 3\%$.

На рис. 5 приводится фотография петли гистерезиса ферритового сердечника марки ВТ-1 размером $2 \times 1,4 \times 1$ мм.

Как указывалось выше, снятие петли гистерезиса с сердечника с остаточным потоком 5 мкс эквивалентно наблюдению сигнала с амплитудой 10 мкв.

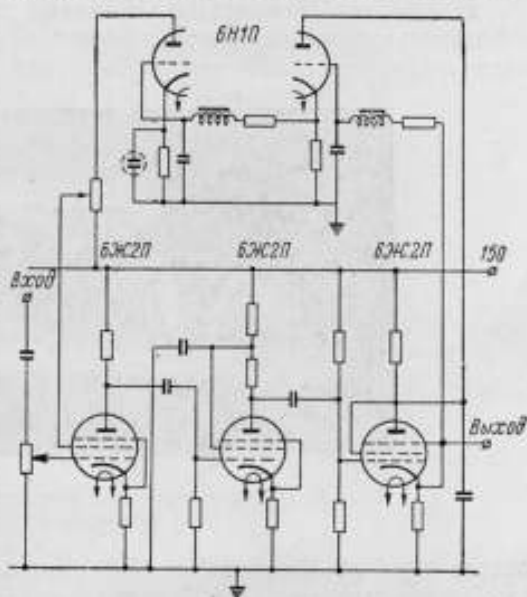


Рис. 4. Принципиальная схема второго блока интегрирующего усилителя.

Следовательно, переходя к наблюдению петель с меньшим поперечным сечением нельзя еще больше поднимать коэффициент усиления. Действительно, при переходе на осциллографе ИО-4 на диапазон с большей чувствительностью становятся заметными высокочастотные шумы.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что без привлечения корреляционных методов нельзя на частоте 1 кГц и съеме сигнала с одного витка вести наблюдения петель гистерезиса объектов с остаточным потоком менее нескольких максвелл.

Пленочные магнитные элементы имеют остаточный поток порядка 0,1 мкс, поэтому приходится пользоваться многовитковой выходной обмоткой.

В работе [4] описана установка для снятия петли гистерезиса с длинных образцов малого поперечного сечения. Сигнал в этой установке снимается с 5000 витков выходной обмотки, внутрь которой встав-

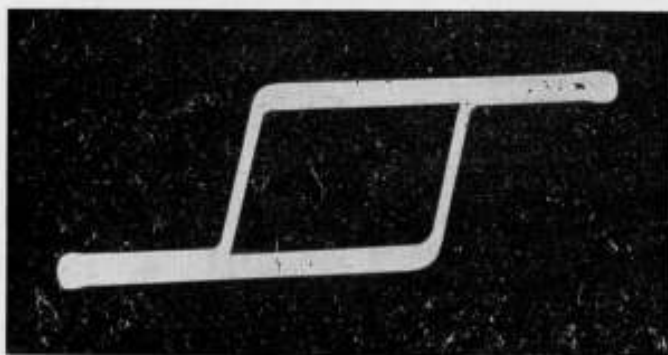


Рис. 5. Петля гистерезиса ферритового сердечника марки ВТ-1 размером $2 \times 1,4 \times 1$ мм.

ляется образец. Катушка из 5000 витков представляет собой значительную индуктивность. При перемагничивании образца с хорошей прямоугольностью петли гистерезиса в контуре, образованном индуктивностью выходной обмотки и паразитными емкостями, возникают ударные колебания, сильно искажающие форму петли гистерезиса в области перехода образца к состоянию насыщения. Чтобы исключить это неприятное явление можно, подбирая амплитуды и фазы второй и третьей гармоник тока, замедлить скорость изменения тока при прохождении его в районе, соответствующем коэрцитивной силе образца. В результате ударные колебания в контуре не возбуждаются. При исследовании образцов с разными коэрцитивными силами приходится при такой методике каждый раз подбирать амплитуды и фазы гармоник.

Чтобы вообще избежать возбуждения ударных колебаний в сигнальной обмотке, следует делать как можно выше ее резонансную частоту. Следовательно, количество витков выходной обмотки, накладываемой на элемент, должно быть по возможности малым.

Используя описанный усилитель, достаточно наложить на элемент примерно 100 витков, что дает для типичного пленочного элемента диаметром 1 см и толщиной 1000 Å потокосцепление 5 мкс.

На рис. 6 показан метод съема сигналов с пленочного элемента. Поле, необходимое для перемагничивания пленочного элемента, создается с помощью однослойного соленоида, внутри которого и помещается кассета с пленкой. Съемная катушка, нанесенная на кассету,

охватывает не только магнитные силовые линии пленочного элемента, но также и линии магнитного поля, создаваемого соленоидом. Поскольку в нашем случае сечение съемной катушки равно $25 \times 2 = 50 \text{ мм}^2$, съемная катушка, при поле внутри соленоида равном, например, 10 э, охватывает магнитный поток 5 мкс, в семьдесят раз превышающий магнитный поток в пленочном элементе. Для компенсации этого потока или точнее напряжения, наводимого при его изменении, в соленоид, кроме рабочей, введены еще две дополнительные кассеты. Одна из них полностью аналогична рабочей кассете и предназначается для грубой компенсации, вторая — меньшего поперечного сечения и с меньшим числом витков служит для тонкой компенсации. Обмотки всех трех кассет включены последовательно (рис. 7).

Все кассеты могут вращаться вокруг вертикальной оси. Угол поворота каждой кассеты отсчиты-

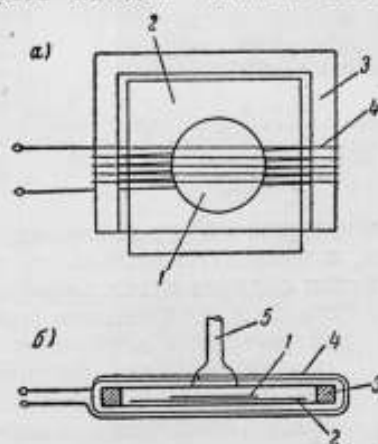


Рис. 6. Кассета с пленкой:

1 — пленочный элемент диаметром 10 мм; 2 — подложка $18 \times 18 \text{ мм}$; 3 — прокладка толщиной 0,2 мм; 4 — обмотка 100 витков в три слоя (диаметр провода 0,08 мм, сечение обмотки $25 \times 2 \text{ мм}^2$); 5 — каркас катушки; 6 — держатель.

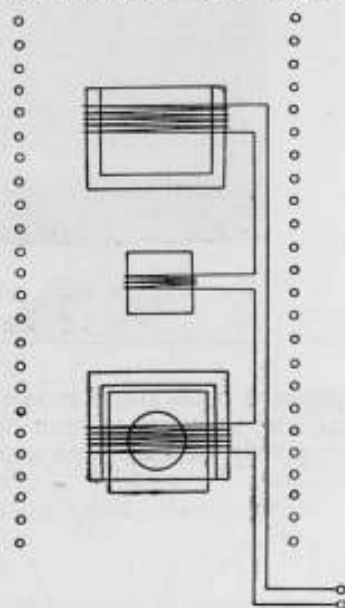


Рис. 7. Соленоид с пленочным элементом в кассете. Параметры соленоида: длина 130 мм; диаметр 400 мм; количество витков 45.

вают по лимбу, неподвижно закрепленному на ее оси. Изменяя угол поворота компенсационных катушек при вынута из рабочей кассеты образце, можно полностью скомпенсировать сигнал связи по воздуху. Тогда при вставленном образце на выходе системы из трех катушек возникают напряжения, связанные только с изменениями намагниченности образца.

На рис. 8 приводится петля гистерезиса с пленочного образца диаметром 1 см и толщиной 1000 Å.

В зависимости от различных факторов перемангничивание пленочного элемента может происходить путем смещения границ между доменами, либо путем вращений намагниченности. Иногда оба процесса сосуществуют. Можно выявить это важное обстоятельство, наложив на пленочный элемент вторую катушку K_2 , перпендикулярную первой катушке K_1 (рис. 9). Впервые такая схема была описана Конгером [5], однако большое число витков в съемных катушках и связанные с этим большие помехи не дали Конгеру возможности получить убедительные результаты.

Обозначим магнитный поток, проходящий через обмотку K_1 — Φ_z , а проходящий через обмотку K_2 — Φ_x . Пусть в начальном состоянии магнитный момент пленки направлен по оси z и магнитный поток проходит только через обмотку K_1 ($\Phi_z = \Phi_0$; $\Phi_x = 0$). Если перематничива-

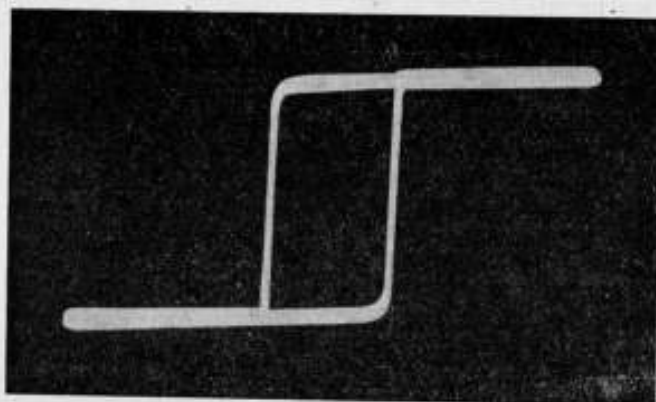


Рис. 8. Петля гистерезиса пленочного элемента диаметром 1 см и толщиной 1000 Å.

ние элемента происходит путем смещения границы между доменами, то направление момента пленки сохраняется, а изменяется только его величина. Следовательно, при перематничивании образца путем смещения

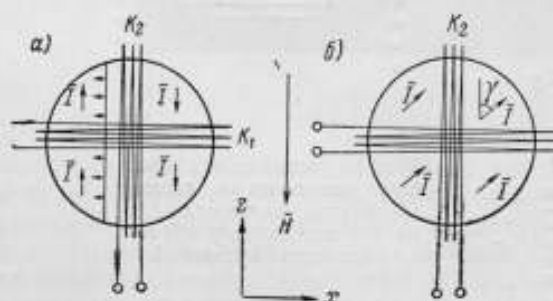


Рис. 9. Различные способы перематничивания пленок: а — перематничивание путем смещения границы; б — перематничивание путем вращения намагниченности.

границы напряжение наводится только в обмотке K_1 (рис. 9, а). Если же перематничивание происходит путем вращения намагниченности, то $\frac{d\Phi_z}{dt}$ и $\frac{d\Phi_x}{dt}$ оказываются отличными от нуля (рис. 9, б). Нетрудно видеть, что при повороте магнитного момента на угол γ относительно оси z

$$\begin{aligned} \Phi_z &= \Phi_0 \cos \gamma \\ \Phi_x &= \Phi_0 \sin \gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

Схема блока с кассетами показана на рис. 10. Напряжения, наводимые в катушках K_1 и K_2 за счет связи по воздуху компенсируются обмотками K_1' и K_2' соответственно. Кассеты с компенсирующими обмотками вращаются вокруг оси y , перпендикулярной плоскости рисунка. Для общности может поворачиваться и измерительная кассета с двумя неподвижно связанными с ней обмотками K_1 и K_2 .

На рис. 11 показана общая схема установки. Для случая съема сигналов с пленочного элемента с помощью двух накрест расположенных катушек.

Напряжения от измерительных катушек K_1 и K_2 усиливаются двумя одинаковыми интегрирующими усилителями, которые необходимы, чтобы наблюдать фигуру, получающуюся при подаче Φ_z и Φ_x

на вертикальную y и горизонтальную x оси осциллографа. Эта фигура представляет собой годограф магнитного момента пленки.

При наблюдении обычной петли гистерезиса, когда используется только обмотка K_1 , на пластины осциллографа должна подаваться величина, пропорциональная току в соленоиде I . Поскольку усилители по осям x и y осциллографа оба являются интегрирующими, ток I до подачи на усилитель должен быть проинтегрирован, что и выполняется воздушной взаимной индуктивностью M . Переключатели Π_1 и Π_2

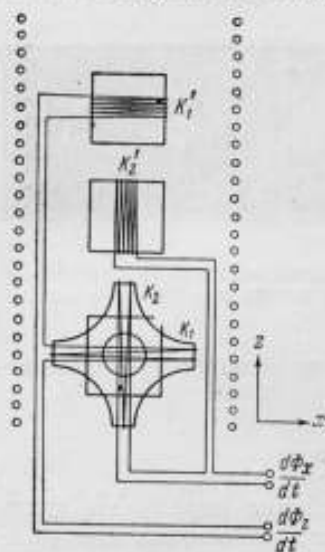


Рис. 10. Сменный блок измерительных и компенсационных катушек.

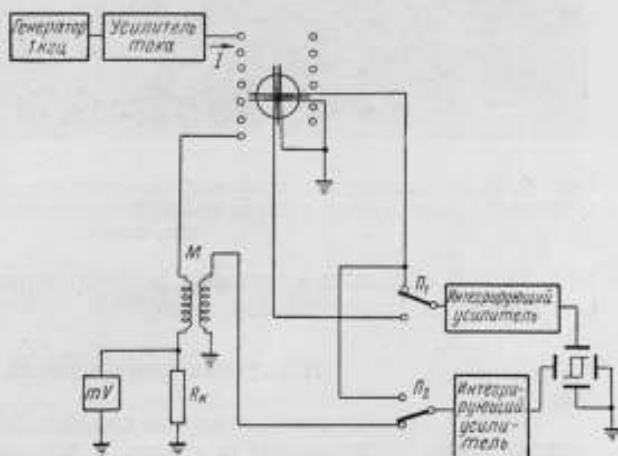


Рис. 11. Общая схема установки.

дают возможность наблюдать на экране следующие четыре пары переменных:

$$\begin{aligned} \text{Ось } y & \dots \dots \Phi_z, \Phi_y, \Phi_x, \Phi_z \\ \text{Ось } x & \dots \dots I, I, \Phi_z, \Phi_z \end{aligned}$$

Первые две комбинации дают петлю гистерезиса по двум направлениям, третья комбинация — представление о процессах в магнитной пленке и четвертая предназначена для уравнивания коэффициентов усиления двух интегрирующих усилителей.

На пленочные элементы заметное влияние оказывают постоянные поля, меняющие форму петли гистерезиса исследуемой пленки; поэтому соленоид вместе с помещенной в кассету пленкой установлен в центре куба, состоящего из системы трех катушек квадратной формы и расположенных по ребрам куба перпендикулярно друг другу. Каждая пара катушек служит для компенсации соответствующей составляющей земного магнитного поля, а также для создания поля в каком-либо одном из трех направлений. На рис. 11 катушки, служащие для создания постоянных полей, не показаны.

Для примера на рис. 12 приводятся петли гистерезиса, снятые с пленочного образца диаметром 1 см и толщиной 1400 Å. Образец установлен так, что переменное поле соленоида действует вдоль его легкой оси. Вдоль тяжелой оси наложено небольшое постоянное поле. Петля гистерезиса в координатах $\Phi_z - I$ приводится на рис. 12, а, а на рис. 12, б — в координатах $\Phi_x I$. Видно, что прямоугольность пр-

дольной петли (рис. 12, а) под влиянием поперечного поля уменьшать. Наличие сигналов в катушке K_2 (петля, рис. 12, б) свидетельствует о присутствии процессов вращения намагниченности. Еще более наглядное подтверждение этому можно видеть на рис. 12, в, где представлен годограф магнитного поля. Хорошо видно, что намагниченность сигнала поворачивается до некоторого критического угла, после чего идут процессы смещения границ между доменами (модуль магнитного момента резко уменьшается). Таким образом, последовательно наблюдая петли



Рис. 12. Петля гистерезиса пленочного элемента при наличии постоянного поперечного магнитного поля: а — продольная петля; б — поперечная петля; в — годограф магнитного момента.

рис. 12, а, б, в, можно составить полную картину явлений при перемагничивании пленочного образца.

Измерение коэрцитивной силы

По геометрическим размерам соленоида можно определить связь между током в соленоиде и полем в том месте соленоида, где установлен пленочный элемент. Эта связь, однако, зависит от многих трудно измеримых величин; поэтому измерение коэрцитивной силы точнее производить путем создания постоянного поля, направленного вдоль оси соленоида. Постоянное поле, которое можно измерить с высокой точностью с помощью баллистического гальванометра, смещает петлю гистерезиса. Величина смещения и дает возможность отградуировать усилитель по горизонтальной оси в э/мм.

До измерения на установке коэрцитивной силы и остаточного потока следует скорректировать фазы обоих интегрирующих усилителей. Коррекция фазы по оси y осциллографа производится по совпадению прямой и обратной ветви петли гистерезиса на образце с резким переходом к насыщению. После того, как усилитель по оси y скорректирован, корректируется интегрирующий усилитель по оси x . Для этого измерительная кассета поворачивается на небольшой угол, в результате чего на усилитель по оси y подается небольшой сигнал связи по воздуху. Фаза усилителя по оси x корректируется до тех пор, пока эллипс на экране осциллографа не превратится в прямую линию. Неточная корректировка фазы усилителя y приводит к систематической ошибке измерения остаточного потока, а по оси x — к ошибке в величине коэрцитивной силы.

Измерение остаточного потока

Непосредственно на установке производится измерение остаточного потока, а пересчет на индукцию можно произвести, только зная толщину пленки. Измерение магнитного потока может производиться либо методом воздушной взаимной индуктивности, либо с использованием нормального образца ферритового сердечника с точно известным оста-

точным потоком. Метод изготовления такого сердечника подробно описан выше. Предпочтительнее пользоваться методом нормального образца, так как трудно точно выдержать геометрию катушки взаимной индуктивности. Нормальный образец устанавливается на вход интегрирующих усилителей вместо сменного блока с соленоидом и кассетами, после чего определяется постоянная интегрирующего усилителя по оси y в максвеллах на 1 мм смещения луча на экране осциллографа. Устанавливая затем на место блок с соленоидом и кассетами, в одной из которых находится образец, и измеряя размах петли гистерезиса пленочного элемента, определяем остаточное потокосцепление, поступающее на вход интегрирующего усилителя. После этого, зная число витков съемной катушки и коэффициент охвата потока K , возникающий в силу того, что часть силовых линий пленочного образца замыкается внутри съемной катушки, легко определить остаточный магнитный поток пленочного образца.

Формула для коэффициента охвата K имеет вид:

$$K = \left[\left(\frac{\Delta}{D} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{\Delta}{D}, \quad (5)$$

где D — диаметр пленочного элемента;

Δ — зазор между витками плоской катушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Визун Ю. И., «Магнитные элементы», сборник статей Института точной механики и вычислительной техники АН СССР, 1960, стр. 75.
2. Кобелев В. В., «Магнитные элементы», сборник статей Института точной механики и вычислительной техники АН СССР, 1960, стр. 96.
3. Booth A. D. J. Sci. Instr., 30, 384, 1953.
4. Crittenden E. C., Hudimac A. A., Strough R. I., Reg. Sci. Instr., 22, 872, 1951.
5. Conger R. C., Phys. Rev., 98, 1752, 1955.

А. А. КОРСУНСКИЙ

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

В статье описан прибор, основанный на использовании магнитооптического эффекта Керра, предназначенный для наблюдения магнитной структуры ферромагнитных пленок.

В настоящем приборе для наблюдений магнитной структуры ферромагнитных пленок использован магнитооптический эффект Керра. Сущность этого эффекта состоит в повороте плоскости поляризации света (поляризованного в плоскости падения или перпендикулярно ей, при его падении на ферромагнитное зеркало, намагниченное в направлении плоскости падения (меридиональный эффект Керра)). Величина

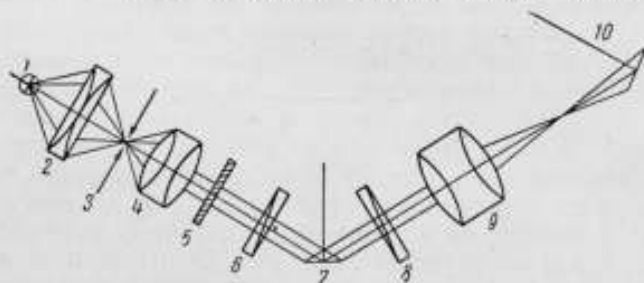


Рис. 1. Оптическая схема прибора.

угла поворота существенно зависит от величины намагниченности, а направление вращения определяется направлением вектора намагниченности. Это дает возможность с помощью поляризатора почти полностью погасить свет, отраженный от одной области ферромагнитной пленки (с одним направлением вектора намагниченности), оставив, правда, ввиду малости эффекта довольно малую, но ощутимую часть света, отраженного от другой области (с противоположным направлением вектора намагниченности). В результате при отражении света от ферромагнитного зеркала, разбитого на области, наблюдается картина в виде темных и светлых областей.

Оптическая схема прибора изображена на рис. 1.

Для получения мощного светового потока использована крeптонксеноновая кварцевая лампа 1 сверхвысокого давления ГСВД-120. Це-

лесообразность применения этой лампы объясняется следующими причинами: лампа дает довольно мощный световой поток при относительно небольшой величине разрядного промежутка, максимум спектральной характеристики лампы приходится на длину волны 5000 \AA , т. е. на середину области видимого света. Кроме этих положительных качеств лампа обладает и недостатками. Прежде всего надо указать на следующие: наличие высокого давления в колбе требует очень осторожного обращения с ней — включение и работа с лампой допускается только в металлическом кожухе; во время работы лампа сильно нагревается, что влечет за собой необходимость введения специального принудительного охлаждения. При попадании на лампу пыли и жира происходит пригорание их к колбе и кварцевое стекло теряет прозрачность (это обстоятельство требует регулярной протирки колбы кварцевой лампы спиртом, что совершенно необходимо делать перед каждым включением); при зажигании лампа должна иметь комнатную температуру и, наконец, для зажигания требуется наличие высокого напряжения высокой частоты, необходимого для поджога разрядного промежутка, что создает дополнительные неудобства.

Прежде чем свет попадает на коллиматорную линзу, он проходит через два элемента. Первый из них — конденсорная линза 2, второй — диафрагма 3 (рис. 1). Назначение этих элементов следующее: ввиду сильного нагревания лампы, ее невозможно поставить в фокусе коллиматорной линзы во избежание расклейки линзы, так как ее фокусное расстояние всего 50 мм. Кроме того, для получения достаточно параллельного пучка необходимо иметь точечный источник; эта задача как раз и решается диафрагмой, величина отверстия которой составляет 4 мм (такого же порядка величина разрядного промежутка лампы ГСВД-120); таким образом диафрагма позволяет устранить свечение баллона и свет, отраженный от других предметов. Конденсорная линза поставлена приблизительно на двойном фокусном расстоянии как от лампы, так и от диафрагмы.

Параллельный пучок света попадает на достаточно узкий интерференционный светофильтр 5 (резонансная длина волны $\lambda = 5570 \text{ \AA}$, ширина полосы пропускания $\Delta\lambda = 50 \text{ \AA}$), который установлен между коллиматором 4 и поляризатором 6. Необходимость введения фильтра вызвана следующими причинами: а) значительная хроматическая аберрация конденсорной линзы вызывает появление сильной радуги, что делает невозможным качественное наблюдение картины; б) примененные в установке пленочные гиропатитовые поляризаторы обладают большой селективностью по спектру (красную и фиолетовую части спектра они почти не поляризуют).

Следует заметить, что значительная величина эффекта Керра для пермаллоя дает возможность четкого наблюдения доменной структуры с помощью пленочных поляризаторов. Это существенный момент, так как даже самые лучшие их экземпляры уступают по степени поляризации классическим поляризационным призмам из исландского шпата, которые за последнее время стали большой редкостью (особенно с большим световым окном). На рис. 2 для иллюстрации приведена одна из фотографий магнитной структуры пленочного образца, наблюдавшейся на описываемом приборе. Из ее рассмотрения видно, что прибор имеет довольно удовлетворительную разрешающую способность, которая по грубой оценке составляет 200 линий на сантиметр (диаметр образца 1 см).

Линейно поляризованный, почти монохроматический пучок света падает на образец 7 под углом 60° (рис. 1). Отраженный свет проходит через анализатор 8, объектив 9 и попадает на экран 10.

Угол падения, равный 60° , был выбран из следующих соображений. Как показывает теоретический расчет, величина эффекта в зависимости от угла определяется лишь величиной комплексной диэлектрической проницаемости и совершенно не зависит от магнитных и магнито-

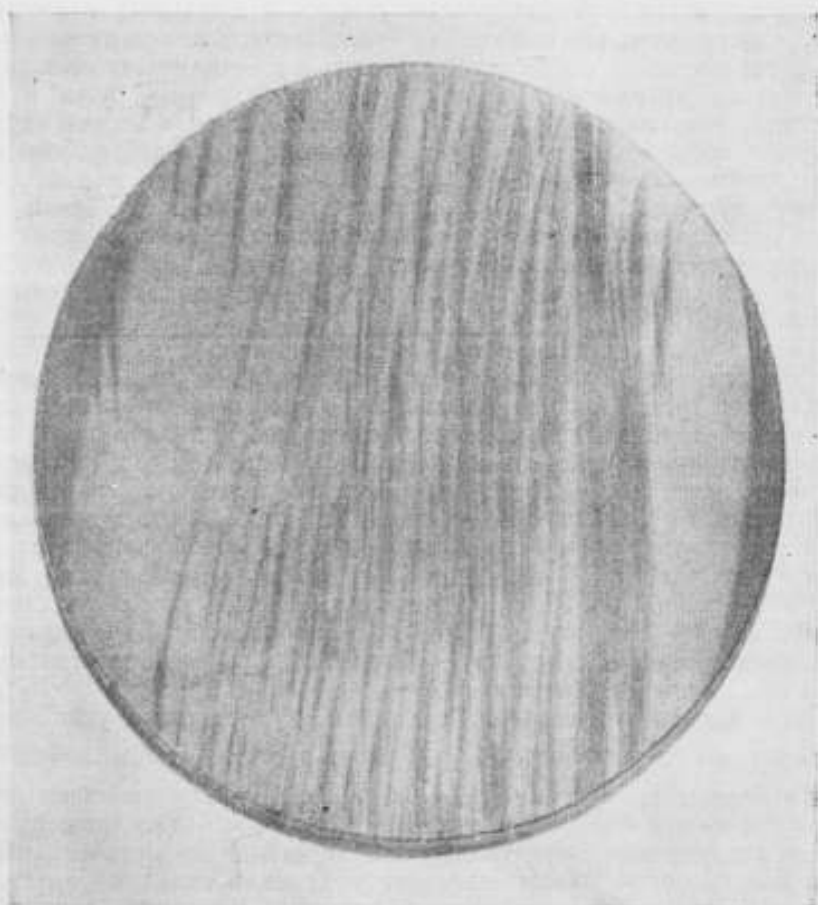


Рис. 2. Магнитная структура пленочного образца.

оптических свойств ферромагнетика. Типичная кривая зависимости величины потока от угла падения пучка света приведена на рис. 3, из которого видно, что максимум эффекта лежит в области $40 \div 60^\circ$.

Из соображений конструктивных удобств объектив 9 выбран с достаточно длинным фокусным расстоянием (110,6 мм). Он помещен приблизительно на двойном фокусном расстоянии как от объектива, так и от экрана 10, т. е. изображение получается в натуральную величину.

Для получения правильного и резкого изображения экран необходимо поставить под тем же углом к оптической оси, что и образец.

Конструктивно прибор оформлен в виде двух труб (рис. 4). Первая из них включает конденсорную линзу, диафрагму, коллиматор, интерференционный фильтр, поляризатор. Вторая — анализатор и объ-

ектив. Непосредственно к первой трубе прикреплен осветительный блок. Обе трубы жестко соединены с центральной частью прибора, в которой располагается предметный столик с системой его перемещения и катушки, создающие магнитное поле, в котором исследуется образец (на оптической схеме они не показаны).

Фотокамера устанавливается на приборе через посредство специальной насадки, сопрягающейся со второй оптической трубой.

В приборе предусмотрено относительно свободное регулирование положения линзы и объектов на оптической оси, а также регулирование положения поляризаторов. Все детали прибора выполнены из диамагнитных материалов.

С помощью созданной установки возможно наблюдать магнитную структуру ферромагнитных пленок в статических условиях, а также процессы перемагничивания в очень медленно меняющихся продольных и поперечных магнитных полях.

Эти поля создаются системой катушек. В ее состав входят четыре пары независимых катушек, создающих поле вдоль одной (две пары) и вдоль другой (две пары) оси. На рис. 5, на котором приведена принципиальная схема устройства управления магнитным полем только



Рис. 3. Кривая зависимости потока от угла падения пучка света.

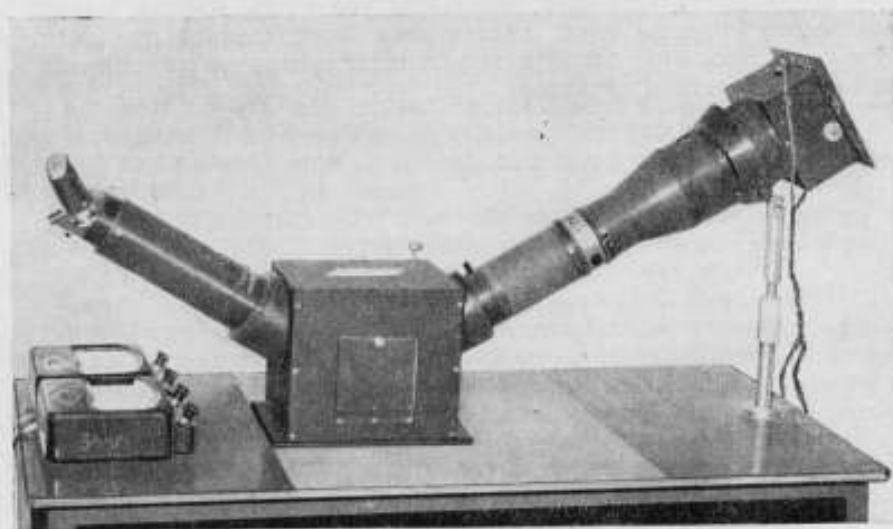


Рис. 4. Внешний вид прибора.

вдоль одной оси (для другой оси схема совершенно аналогична), эти пары катушек обозначены как L_1 и L_2 . Ток через каждую пару катушек можно регулировать независимо, изменяя напряжение на базе кристаллических триодов (на рис. 5 обозначены T_1 – T_4) реостатами R_1 и R_2 (сопротивление каждого 470 ом). Кроме того, возможно изменять направление тока в паре катушек L_1 .

Контроль за величиной напряженности поля производится по показаниям милливольтметра mV на 150 мв , измеряющего падение напряжения на калиброванных сопротивлениях R_3 и R_4 в $0,05 \text{ ом}$, включенных последовательно с катушками.

Поле, создаваемое катушками, имеющими квадратное сечение, в центре куба, составленного из двух пар таких катушек, определяется выражением

$$H = \frac{8nl}{10a\sqrt{3}},$$

где n — число витков в одной катушке;

I — ток в амперах;

a — сторона куба в сантиметрах;

H — напряженность поля в эрстедах.

Остановимся теперь на возможностях прибора после его модернизации. После удаления светофильтра, как показывает опыт, количество света увеличивается настолько, что становится возможно свободное визуальное наблюдение

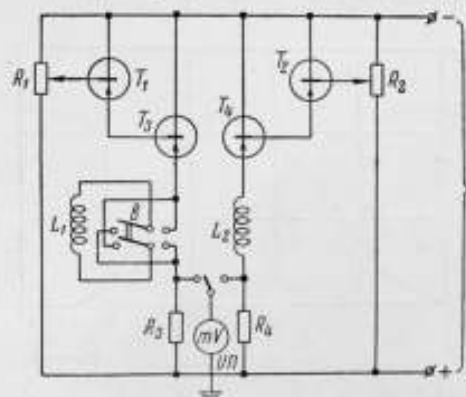


Рис. 5. Принципиальная схема устройства для управления магнитным полем.

получаемой картины. Однако качество наблюдаемой картины ухудшается, что связано с недостаточным качеством пленочных поляризаторов. Вероятно, после замены последних призмами, этот недостаток будет исключен. Кроме того, возможно увеличить эффект, нанося на исследуемые образцы слой диэлектрика определенной толщины, но этот способ довольно сложен и не позволяет проводить наблюдения над большим количеством образцов.

В. А. КАДКИН

МАГНИТОМЕТР С ВИБРИРУЮЩЕЙ КАТУШКОЙ

В статье рассматривается метод определения кривых намагничивания и петель гистерезиса ферромагнитных образцов в форме эллипсоида с помощью магнитометра с вибрирующей катушкой. Приводится описание предложенного автором магнитометра.

За последнее время разработан ряд устройств для магнитных измерений в открытой магнитной цепи, работа которых основана на вибрации измерительной катушки. Катушка располагается коаксиально у одного конца образца и вибрирует вдоль его оси. Если образец намагничен, то вибрирующая катушка является источником переменной э. д. с. Для усиления последней применяются радиотехнические схемы.

К таким устройствам относятся, например, коэрцитиметры, описанные Нейманом [1] и Уоткинсом [2], отличающиеся между собой способами сообщения вибраций измерительной катушке и конструкцией индикаторов переменной э. д. с. в катушке.

В этих устройствах коэрцитивная сила H_c удобно и быстро определяется величиной напряженности обратного магнитного поля, при котором исчезает э. д. с. индукции в катушке.

Смит [3] создал магнитометр с вибрирующей катушкой МК для автоматической записи магнитных характеристик малых сферических ферромагнитных образцов, находящихся в поле электромагнита. Непрерывное генерирование переменной э. д. с. в катушке и зависимость ее величины только от радиальной составляющей магнитного поля образца позволяет иметь зазор или даже помещать образец на некотором расстоянии от катушки. Это дает возможность быстро менять образцы и проводить температурные и другие измерения.

Соленоид по сравнению с электромагнитом обладает тем преимуществом, что напряженность его магнитного поля прямо пропорциональна силе тока. Это удобно для измерения напряженности.

В соленоиде легче создать однородное поле на большей длине, чем в электромагните, и поэтому имеется возможность применения удлиненных образцов с меньшим размагничивающим фактором, чем у сферических образцов.

Автором [4] был предложен МК с образцами в форме вытянутого эллипсоида вращения, которые помещаются в поле соленоида. Точки кривых намагничивания и петель гистерезиса определяются здесь путем измерения амплитуды переменной э. д. с. потенциометром постоянного

тока. Расчет вибрирующей катушки для исследуемых образцов сферической формы был дан Смитом [3].

Расчет тонкой катушки для образцов в форме вытянутого эллипсоида вращения, проведенный автором, показывает, что амплитудное значение э. д. с. E_{\max} катушки прямо пропорционально намагниченности образца J в гауссах и равно

$$J = \gamma E_{\max}. \quad (1)$$

В выражении (1)

$$\gamma = \frac{10^8}{4\pi^2 A \omega r \nu \bar{f}(z)}, \quad (2)$$

где γ — в гауссах на вольт;

A — амплитуда механических колебаний катушки, см;

ω — полное число витков обмотки;

r — радиус намотки, см;

ν — частота колебаний, сек⁻¹;

$\bar{f}(z)$ — среднее значение некоторой функции $f(z)$; в интервале z_1, z_2 , $f(z)$ представляет собою радиальную составляющую магнитного поля образца при его намагниченности в 1 гс и зависит, кроме переменной z , от таких параметров, как радиус намотки и геометрические размеры образца. z_1 и z_2 — координаты начала и конца обмотки относительно центра образца, в положении максимальной скорости катушки v_0 .

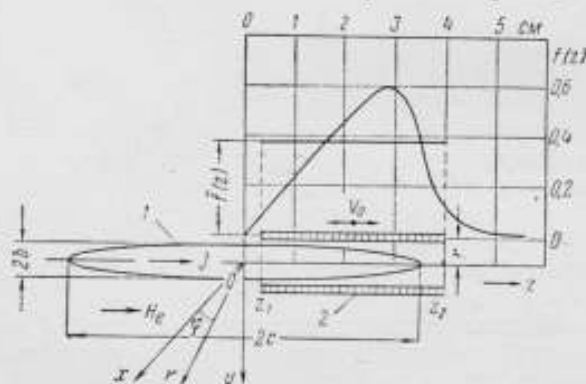


Рис. 1. Ферромагнитный эллипсоид с измерительной катушкой в однородном магнитном поле, график функций $f(z)$ и ее среднее значение $\bar{f}(z)$ в интервале z_1, z_2 .

На рис. 1 представлены ферромагнитный образец I в однородном магнитном поле H_e , катушка 2 и графики функций $f(z)$ и $\bar{f}(z)$ применительно к рассматриваемому случаю.

Важной особенностью МВК является возможность экспериментального определения постоянной МВК без знания таких величин, как A , ω , r , ν и $\bar{f}(z)$. Такое определение можно произвести по формуле (1), измеряя э. д. с. при помощи эллипсоидальных образцов с известной остаточной намагниченностью и стабильных в магнитном отношении, или с известной намагниченностью насыщения [3].

Абсолютное определение γ можно осуществить аналогично при помощи соленоида в форме вытянутого эллипсоида вращения. Такой эллипсоидальный соленоид создает внешнее поле, подобное полю намагниченного эллипсоида, обладающего намагниченностью

$$J = 0,1 n_0 I_0, \quad (3)$$

где n_0 — число витков на 1 см длины соленоида;

I_0 — сила тока в нем, а;

J — намагниченность, в гауссах.

На основании расчета и описания [4] был сконструирован и изготовлен опытный МВК. В таблице приведены его расчетные данные, а на рис. 2 — его схема.

Наименование величины	Обозначение	Числовое значение
Постоянная магнитометра	γ	1420 <i>гс/в</i>
Малые полуоси образца	$a = b$	0,35 <i>см</i>
Большая полуось образца	c	3,50 <i>см</i>
Радиус намотки катушки (средний)	r	0,525 <i>см</i>
Координата начала катушки относительно центра образца	z_1	0,34 <i>см</i>
Координата конца катушки относительно центра образца	z_2	4,00 <i>см</i>
Среднее значение функции $f(z)$	$\bar{f}(z)$	0,373
Число витков катушки (полное)	w	1465
Число рядов катушки	m	2
Частота колебаний катушки	ν	24,33 <i>1/сек</i>
Амплитуда колебаний катушки	A	0,255 <i>см</i>
Число витков на 1 см длины эталонного соленоида	n_0	83,57 <i>1/см</i>

Согласно рис. 2 в поле намагничивающего соленоида 3 находится образец 1 и измерительная катушка 2. При работе электродвигателя

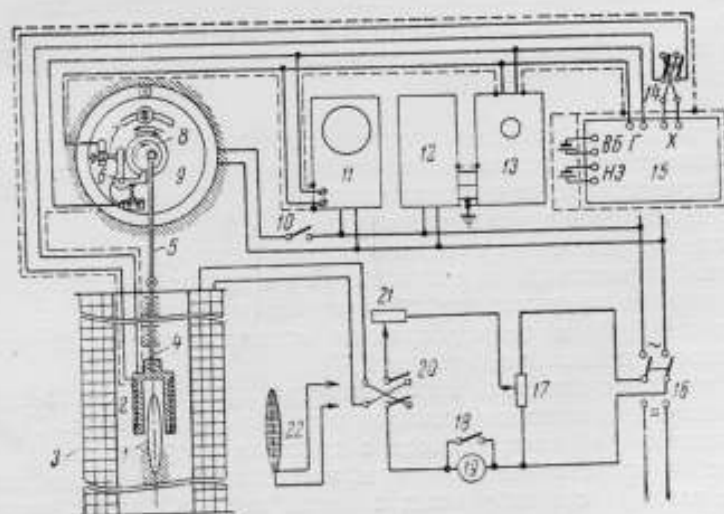


Рис. 2. Схема магнитометра с вибрирующей катушкой.

(не показанного на рис. 2) измерительная катушка совершает колебательное движение при помощи кулачка 8, кривошипа 5 и ползуна 4. Прерыватель 7 работает синхронно э. д. с., так как связан с кулачком

посредством текстолитового рычага 6 и вместе с рычагом смонтирован на эбонитовой шайбе 9.

Амплитуда переменной э. д. с. измеряется потенциометром 15 постоянного тока типа ППТВ-1. К клеммам X потенциометра через переключатель 14 подключена катушка, а к клеммам Г — контакты прерывателя, катодный осциллограф 11 и электронный нуль-индикатор 13, питающийся от кенотронного выпрямителя 12. О возможности такого измерения было сообщено в работе [5], там же дано описание электронного нуль-индикатора.

При помощи потенциометра 17, группы реостатов 21, многопредельного магнитоэлектрического амперметра 19, переключателей 16 и 20 и выключателя 18 производится включение, переключение, регулирование и измерение постоянного тока в намагничивающем соленоиде, а также включение и регулирование тока частотой 50 гц в последнем при намагничивании образца.

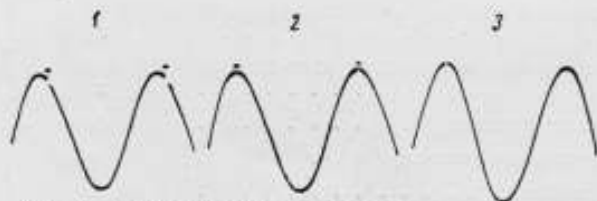


Рис. 3. Осциллограммы процесса установления момента и продолжительности замыкания прерывателя.

Включение и выключение электродвигателя производится выключателем 10. Определение постоянной магнитометра осуществляется эталонным эллипсоидальным соленоидом 22.

Эталонный эллипсоидальный соленоид намотан на текстолитовый каркас и имеет размеры образца.

Для определения постоянной МВК эталонный эллипсоидальный соленоид подключается к переключателю 20 вместо намагничивающего соленоида и затем помещается в соленоид вместо образца 1. По силе тока и э. д. с. из выражений (3) и (1) определяется постоянная магнитометра.

Для нормальной работы магнитометра прерыватель должен замыкаться в момент прохождения амплитудного значения э. д. с. Такое совмещение осуществляется поворотом шайбы 9. Продолжительность замыкания регулируется винтом прерывателя 7.

Наблюдение ведется по катодному осциллографу.

На рис. 3 представлены осциллограммы процесса совмещения момента замыкания прерывателя с моментом прохождения амплитуды э. д. с. (кривые 1, 2) и осциллограммы процесса регулирования продолжительности замыкания (кривые 2, 3).

Установка рабочего тока потенциометра производится по нормальному элементу при помощи электронного нуль-индикатора. При этом электродвигатель работает, приводя в действие прерыватель.

На рис. 4 представлена фотография некоторых «узлов» магнитометра, для наглядности собранных в одном месте. Образец, катушка и механизм, приводящий ее в движение, укреплены на дубовой рейке. Длинная часть рейки имеет полукруглое сечение и может свободно вставляться в соленоид и заклиниваться специальными клиньями, имеющими также полукруглое сечение.

Для испытания магнитометра были взяты эллипсоидальные образцы трансформаторного железа, никеля и углеродистой стали. Определя-

лись коммутационные кривые намагничивания, петли гистерезиса и коэрцитивная сила.

Перед началом измерения магнитных характеристик образец размагничивался переменным током. Снятие точек коммутационных кривых намагничивания производилось путем последовательного измерения амплитуды э. д. с. катушки при заданных значениях намагничивающего тока в порядке его возрастания от 0 до I_{max} . Перед каждым измерением э. д. с. ток коммутировался несколько раз. Намагниченность вычислялась по формуле (1).

Для получения точек петель гистерезиса измерение э. д. с. производилось последовательно при изменении намагничивающего тока от $+I_{max}$ до $-I_{max}$, после его коммутирования.

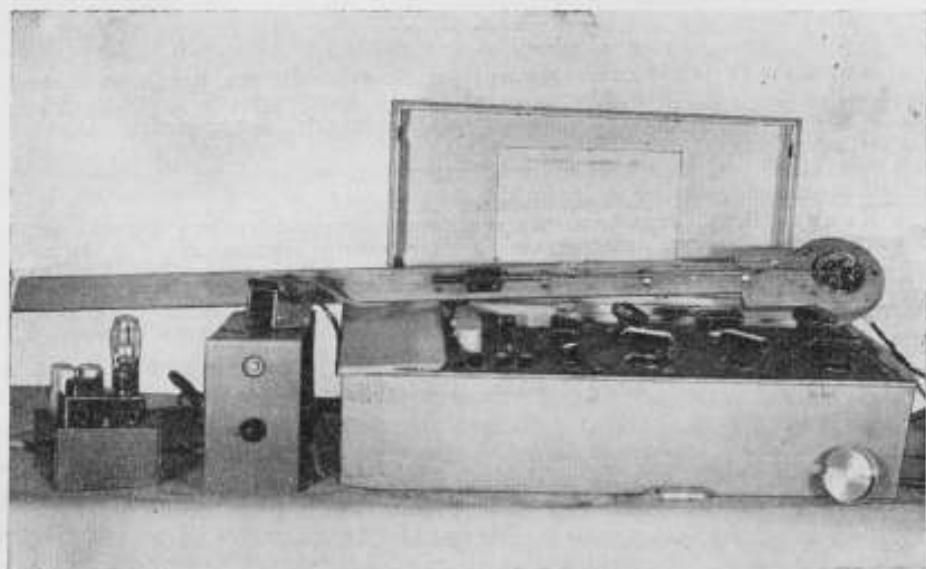


Рис. 4. Отдельные «узлы» магнитометра.

Испытания показали сходство магнитных характеристик с характеристиками, полученными баллистическим методом переключений тех же образцов. Испытание подтвердило справедливость расчетных формул.

Опыт работы с МВК показал, что его производительность в несколько раз выше производительности баллистической установки, поскольку при его применении:

- 1) не требуется размагничивать образец каждый раз перед снятием точки кривой, как это делается по методу переключений;
- 2) нет необходимости наматывать обмотки на образцы; зазор между образцом и измерительной катушкой позволяет быстро менять образцы и не требует введения поправок;
- 3) потенциометр дает возможность проводить измерения в широком диапазоне намагниченностей без шунтирования;
- 4) время успокоения электронного нуля-индикатора практически равно нулю;
- 5) подсчет намагниченности отличается простотой и сводится к умножению э. д. с. на постоянную МВК;

б) коэрцитивная сила определяется точно, без дополнительных приспособлений для сдергивания катушки или выдергивания образца.

МВК обладает большими возможностями для точных магнитных измерений. Действительно, погрешность данного МВК определяется классом точности потенциометра постоянного тока, а применение одной и той же измерительной катушки и одинаковых образцов при отсутствии влияния вихревых и экстра-токов дает возможность проводить сравнительные измерения магнитных свойств различных материалов.

Для приближенных измерений возможно применение образцов в виде цилиндров с конусными концами, параболических пластинок из листовых материалов и т. д.

На основе данного МВК можно создать производительное устройство для измерения и исследования магнитных свойств ферромагнитных материалов в постоянных магнитных полях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neuman H., Gerät zum Messen der Koerzivkraft von ferromagnetischen Körpern, Patentschrift N 709048, klasse 21e, gruppe 12, 1941.
2. Watkins J., Amillpoint method of coercivity determination, *Journal Scientific Instruments*, 31, N 2, 1954, p. 69.
3. Smith D. O., Development of Vibrating-Civil magnetometer, *The Review of Scientific Instruments*, 27, N 5, 1956, p. 261.
4. Кадкин В. А., Устройство для измерения магнитных свойств ферромагнитных материалов, Описание изобретения к авторскому свидетельству № 110228, класс 21e, 12, Стандартгиз, 1958.
5. Кадкин В. А., «Известия вузов СССР». Серия «Приборостроение», № 1, 1960, стр. 45.

Э. С. ВАСИЛЕВСКАЯ, Л. Н. СЫРКИН
М. А. ШАМОВСКАЯ

МЕТОДИКА И АППАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В статье предлагается новый метод измерения динамических магнитострикционных параметров и дается его теоретическое обоснование, приводится описание разработанной для таких измерений импульсной аппаратуры.

Методы, которые могут быть применены для измерения динамических магнитострикционных (а также и пьезоэлектрических) параметров различных материалов, целесообразно разделить на прямые и косвенные. Прямые методы отличаются тем, что преобразование механической величины (амплитуды деформации или напряжения) в непосредственно измеряемую электрическую величину (ток, напряжение, сопротивление) осуществляется вне исследуемого образца, т. е. в измерительной схеме.

В косвенных же методах электромеханическим преобразователем, используемым для измерения механической величины, является сам исследуемый образец; расчет динамических магнитострикционных параметров и амплитудных значений механических переменных производится по измеряемым электрическим параметрам эквивалентной электромеханической схемы образца или с применением исходных магнитострикционных уравнений, связывающих механические и магнитные переменные при возбуждении колебаний в магнитоупругой среде.

Принципиальным преимуществом прямых методов перед косвенными является то, что их точность, чувствительность, частотный и динамический диапазоны, вообще говоря, не зависят от свойств измеряемого образца.

Однако в настоящее время, к сожалению, отсутствуют прямые методы измерения динамических напряжений в малых образцах.

Что же касается прямых методов измерения динамических деформаций (методы проволочных и пьезокерамических тензометров, емкостного бесконтактного датчика, метод измерения по звуковому давлению в воздухе), то они обладают или недостаточной чувствительностью, или недостаточной точностью, или ограничены по частотному диапазону.

Кроме того, их применение связано с экспериментальными трудностями и в ряде случаев требует разработки специальной радиотехнической аппаратуры.

До последнего времени единственными методами, широко применявшимися для исследования магнитострикционных колебаний, были

методы круговых диаграмм и резонанса—антирезонанса. Они являются косвенными, так как предусматривают расчет величин, характеризующих магнитоупругие свойства материала, исходя из экспериментально измеряемых параметров эквивалентной электромеханической схемы.

Отметим некоторые недостатки указанных методов:

а) методы неприменимы при средних и больших индукциях возбуждения B_{\max} ;

б) измерения должны производиться вблизи частоты механического резонанса f_0 , поэтому для данного образца невозможно исследовать частотную зависимость параметров;

в) если магнитными и механическими потерями в образце нельзя пренебречь, то метод резонанса—антирезонанса усложняется; погрешность измерений возрастает;

г) метод круговых диаграмм требует проведения многократных измерений (при нескольких близких к резонансу частотах);

д) измерения обычно проводятся в режиме незатухающих колебаний, что приводит к разогреву образца и изменению его свойств; эти недостатки ограничивают возможности использования методов резонанса—антирезонанса и круговых диаграмм; поэтому параллельно с усовершенствованием прямых методов измерения динамических магнито-стрикционных параметров, проводилась работа по созданию косвенного метода, более совершенного, чем существующие.

Предлагаемый метод, основы которого были изложены на III Всесоюзном совещании по ферритам в 1959 г. [1], был разработан в результате теоретического анализа переходных процессов в магнито-стрикционном сердечнике при импульсном возбуждении.

Рассмотрим циркулярно поляризованный тороидальный образец магнито-стрикционного материала (например феррита), возбуждаемый переменным током частоты $\frac{\omega}{2\pi}$, проходящим в обмотке, равномерно распределенной по периметру образца. * Если индукция в образце поддерживается синусоидальной, а ее амплитуда мала, то можно считать, что образец совершает радиальные колебания с частотой $\frac{\omega}{2\pi}$ под воздействием гармонической, циркулярно направленной силы магнито-стрикционного происхождения.

Однако с ростом амплитуды индукции начинает сказываться нелинейность магнитомеханической связи, и кривая колебательной скорости (или упругого напряжения) искажается, хотя кривая индукции по-прежнему остается синусоидальной [2]. Таким образом, при средних и больших значениях B_{\max} вынуждающую силу нужно полагать уже не гармонической, а полигармонической:

$$F(t) = \sum_n F_{mn} \cos(n\omega t + \Psi_n).$$

В то же время в механическом отношении образец с достаточной степенью точности описывается как линейная система. Это связано с тем, что и эффективная масса и гибкость кольцевого ферритового образца не зависят или слабо зависят от амплитуды колебаний; что же касается упругой добротности Q , то хотя имеется сильная амплитудная зависимость этой величины, однако значение Q обычно используемых образцов (при измерениях в воздухе) остается весьма большим, так что

* Для устранения механического демпфирования колебаний образца обмотка наносится поверх специального каркаса, в котором помещен образец.

амплитудная зависимость Q не влияет заметно на характер колебаний.*

Учитывая изложенные соображения, запишем уравнение движения кольца, соответствующее режиму вынужденных колебаний, в виде

$$\ddot{\xi} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = \frac{1}{m} \sum_n F_{mn} \cos(n\omega t + \Psi_n). \quad (1)$$

Пусть в момент времени $t = t_1$ действие «внешней» (магнитострикционной) силы прекратилось.** В этом случае при $t > t_1$ образец будет совершать свободные затухающие колебания в соответствии с уравнением

$$\ddot{\xi} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{\xi} + \omega_0^2 \xi = 0. \quad (2)$$

Начальные условия для решения уравнения (2) определяются из решения уравнения (1) при $t = t_1$:

$$\xi(t_1) = \xi_0 = \sum_n \frac{C_m F_{mn} \cos \varphi_n}{V \left[1 - \left(\frac{n\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{n\omega}{Q\omega_0} \right)^2}; \quad (3)$$

$$\dot{\xi}(t_1) = \dot{\xi}_0 = - \sum_n \frac{n\omega C_m F_{mn} \sin \varphi_n}{V \left[1 - \left(\frac{n\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{n\omega}{Q\omega_0} \right)^2}, \quad (4)$$

где $C_m = \frac{1}{m\omega_0^2}$ — эквивалентная механическая гибкость образца;

$$\varphi_n = n\omega t_1 + \Psi_n.$$

Решение уравнения (2) при заданных начальных условиях имеет вид:

$$\xi(t) = e^{-\frac{\omega_0(t-t_1)}{2Q}} \left[\xi_0 \cos \omega_0(t-t_1) + \left(\frac{\dot{\xi}_0}{\omega_0} + \frac{\xi_0}{2Q} \right) \sin \omega_0(t-t_1) \right]. \quad (5)$$

Имея в виду, что $Q \gg 1$, получим выражение для начальной амплитуды колебательной скорости затухающего процесса $\dot{\xi}_m$ при $t > t_1$ (т. е. при $t \rightarrow t_1$):

$$\dot{\xi}_m \approx \omega_0 \xi_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\dot{\xi}_0}{\omega_0 \xi_0} \right)^2 + \frac{\dot{\xi}_0}{Q\omega_0 \xi_0}}, \quad (6)$$

где ξ_0 и $\dot{\xi}_0$ должны быть взяты из формул (3) и (4).

Рассмотрим вначале случай, когда $F_{mn} = F_m$ при $n = 1$; $F_{mn} = 0$ при $n > 1$, т. е. когда влиянием высших гармоник вынуждающей силы на величину $\dot{\xi}_m$ можно пренебречь. Из уравнений (3), (4), (6), получаем

$$\dot{\xi}_m \approx \frac{\omega_0 C_m F_m}{V \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{Q\omega_0} \right)^2} \times \\ \times V \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \cos^2 \varphi + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{\omega_0}{2Q\omega} \sin 2\varphi \right). \quad (7)$$

* Воспользовавшись методом эквивалентной линеаризации, будем считать, что в уравнение колебаний кольца входит некоторое эффективное значение Q .

** Предполагается, что к моменту t_1 процесс установления колебаний в образце закончился.

Имея в виду, что амплитуда упругой силы F_{ym} , соответствующая $\dot{\xi}_m$, равна $\dot{\xi}_m (\omega_0 C_m)^{-1}$, а механическая гибкость C_m для цилиндрического кольца равна $\frac{1}{4\pi SE} d_{cp}$ (E — модуль Юнга материала; d_{cp} — средний диаметр; S — площадь сечения кольца), получим следующее выражение для максимальной упругой энергии, накопленной в кольце за один период свободных колебаний:

$$\omega_{упр} = \frac{1}{2} C_m F_{ym}^2 = \frac{d_{cp}}{8\pi SE} \frac{F_m^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{Q^2 \omega_0^2}} \times \\ \times \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \cos^2 \varphi + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{\omega_0}{2Q\omega} \sin 2\varphi\right) \right]. \quad (8)$$

В процессе свободных колебаний кольца вследствие обратного магнитострикционного эффекта имеют место периодические взаимопереходы упругой и магнитной энергии, а в измерительной (холостой) обмотке образца возникают затухающие электрические колебания с частотой

$$\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}} \approx \omega_0.$$

Таким образом, при $t > t_1$ динамическая напряженность магнитного поля в образце $H_{дин}$ и индукция $B_{дин} = B_2 = \frac{1}{\mu_{дин}} \cdot H_{дин}$ имеют магнитострикционное происхождение. При этом проницаемость $\mu_2 = \mu_{дин}$ при наличии нелинейных искажений должна быть взята по первой гармонике.

Максимальная преобразованная за полпериода магнитная энергия $\omega_{магн}$ равна

$$\omega_{магн} = \frac{B_{max 2}^2}{8\pi\mu_2} \pi d_{cp} S, \quad (9)$$

где $\pi d_{cp} S$ — объем образца, а величина $B_{max 2}$ — средняя индукция по сечению кольца (максимальное значение).

Квадрат коэффициента электромеханической (или магнитомеханической) связи по определению равен отношению $\frac{\omega_{магн}}{\omega_{упр}}$ (если пренебречь потерями).

Учитывая, что движущая (магнитострикционная) сила F_m равна $a(B_{max 1}) \cdot S$, где $a(B_{max 1})$ — магнитострикционная постоянная по первой гармонике, соответствующая индукции возбуждения $B_{max 1}$ (т. е. при $t < t_1$), получим из уравнений (8) и (9)

$$k^2 = \frac{\omega_{магн}}{\omega_{упр}} = \left(\frac{B_{max 2}}{B_{max 1}} \right)^2 \cdot \frac{\omega_0^2}{\omega^2} \cdot \frac{E}{4\pi\mu_2 [a(B_{max 1})]^2} \cdot \Psi, \quad (10)$$

где

$$\Psi = \Psi \left(\frac{\omega}{\omega_0}; \varphi \right) = \frac{4\pi^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2 Q^2} \right]}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \cos^2 \varphi + \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \left(1 - \frac{\omega_0}{2Q\omega} \sin 2\varphi\right)}. \quad (11)$$

В формуле (10) величина $a(B_{\max 1}) = a_1$ соответствует индукции $B_{\max 1}$, в то время как a_2 соответствует индукции $B_{\max 2}$, поэтому преобразуем формулу (10), введя $a_2 = a(B_{\max 2}) = a_1 \frac{a_2}{a_1}$.

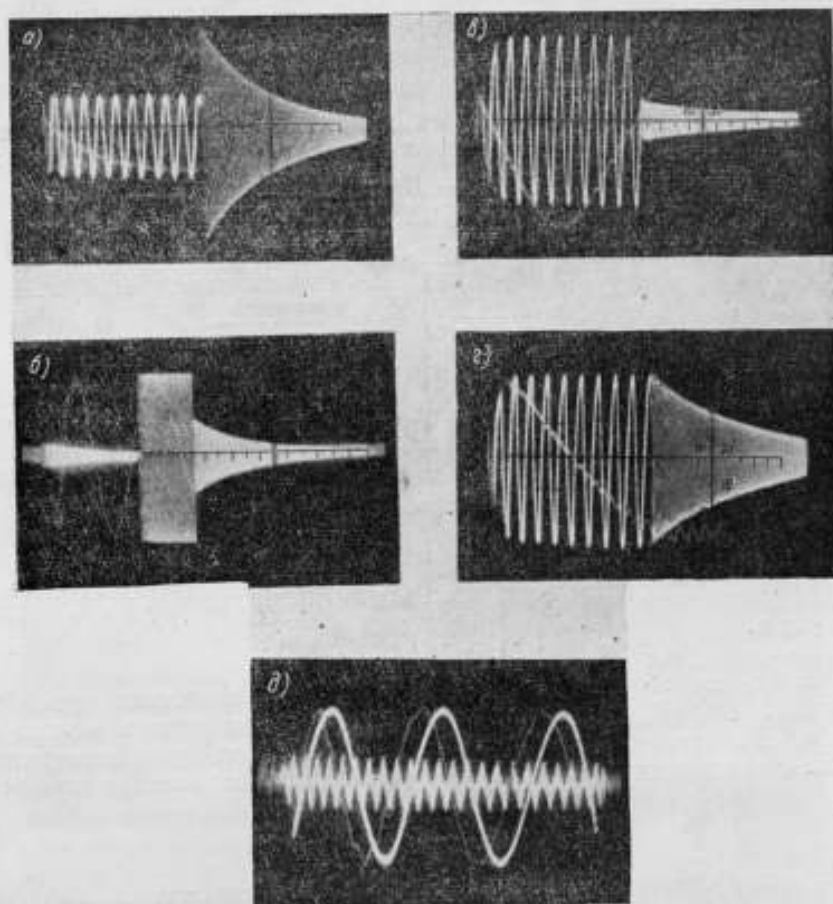


Рис. 1. Осциллограммы радиоимпульсов, полученные для образца магнито-стрикционного феррита ($f_0 \approx 50$ кГц) при низких частотах возбуждения: $a - f = 500$ гц; $\cos \varphi = 1$; $\beta = 2$; $b - f = 5$ кГц; $\cos \varphi = 1$; $\beta = 0,5$; $c - f = 1$ кГц; $\cos \varphi < 1$; $d - f = 1$ кГц; $\cos^2 \varphi = 1$; $\beta = 1$; $e - U_1 = U_{\max 1} \sin \omega t$; $U_2 = U_{\max 2} \sin \omega_0 t$.

Учитывая, что $k^2 = \frac{4\pi\mu a^2}{E} [1]$, а

$$\frac{B_{\max 2}}{B_{\max 1}} = \frac{U_{\max 2}}{U_{\max 1}} \cdot \frac{\omega}{\omega_0} = \beta \frac{\omega}{\omega_0},$$

получим

$$k^2 = \beta \frac{a(B_{\max 2})}{a(B_{\max 1})} \sqrt{\Psi}. \quad (12)$$

Здесь $\beta = \frac{U_{\max 2}}{U_{\max 1}}$ — отношение напряжений на измерительной обмотке образца, соответствующих вынужденным ($U_{\max 1}$) и свободным ($U_{\max 2}$) колебаниям при $t \rightarrow t_1$.

Величины $U_{\max 2}$ и $U_{\max 1}$ измеряются по осциллограммам радиоимпульсов, получаемым с помощью описанной ниже измерительной схемы. Фотографии импульсов, соответствующих различным β (т. е. разным ω), для образца Ni—Zn—Co феррита, приведены на рис. 1, 2. Зависимость величины β от ω для того же образца изображена на рис. 3.

Из рис. 1, 2, 3 видно, что одно и то же значение β получается при трех частотах — низкой частоте ω_n и двух частотах, лежащих вблизи ω_0 («левая» частота ω_l и «правая» ω_p).

Рассмотрим некоторые частные случаи применения формулы (12):

а) $\omega = \omega_n \ll \omega_0$; $B_{\max 1} < 100$ гс.

Так как для всех известных магнитострикционных материалов магнитострикционная постоянная a при $B_{\max} < 100 \div 200$ гс не зависит или почти не зависит от B_{\max} (магнитомеханическая нелинейность отсутствует), а $B_{\max 2} \ll B_{\max 1}$, то $\frac{a(B_{\max 2})}{a(B_{\max 1})} = 1$.

Подстановка условия а) в формулу (11) дает:

$$\sqrt{\Psi_n} \approx \frac{\omega_n}{\omega_0 \cos \varphi}; \quad k^2 \approx \beta \frac{\omega_n}{\omega_0} \cdot \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (13)$$

Таким образом, для проведения измерений k при $\omega \ll \omega_0$ необходимо регулировать и стабилизировать фазу напряжения в момент выключения возбуждающего радиоимпульса (так как β зависит от φ).

Удобнее всего проводить измерения при $\cos \varphi = 1$, т. е. регулировать фазу до получения максимума β . При этом $k^2 = \beta \cdot \frac{f}{f_0}$, а погрешность измерения k за счет ошибки в установке фазы получается наименьшей. Действительно, как видно из уравнения (13), $\left(\frac{\Delta k}{k}\right)_\varphi = \Delta \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi$.

б) $\omega = \omega_n \ll \omega_0$; $B_{\max 1} \gg 100$ гс.

В этом случае магнитомеханической нелинейностью пренебречь нельзя, т. е. $a(B_{\max 2}) > a(B_{\max 1})$ [3]. При этом всегда можно выбрать ω_n так, чтобы $B_{\max 2}$ было < 100 гс, и метод дает возможность измерить амплитудную зависимость a . Полагая $\cos \varphi = 1$, получим

$$\frac{a(B_{\max 1})}{a(B_{\max 2})} = \beta \frac{f_n}{f_0} \frac{1}{k_0^2}, \quad (14)$$

где k_0 — коэффициент электромеханической связи при $B_{\max} < 100$ гс, измеренный предварительно импульсным методом (формула 13) или методом резонанса — антирезонанса.

в) $\omega \approx \omega_0$.

Измерения вблизи частоты ω_0 дают возможность определять k_0 в условиях, больших динамических упругих напряжений, а также непосредственно измерять динамическую механическую прочность и усталостные характеристики материала путем оценки амплитуды упругой силы (см. формулы (7), (8), а также литературу [1]).

Нетрудно видеть, что при $\omega \approx \omega_0$ величина Ψ не зависит от фазы φ . Из формулы (11) следует:

$$\Psi_{\omega \approx \omega_0} \approx \left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \frac{\omega^2}{\omega_0^2 Q^2} \right] \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \approx \left(\frac{2\delta}{\omega_0} \right)^2 \left[1 + \left(\frac{\omega_0}{2Q\delta} \right)^2 \right], \quad (15)$$

где $\delta = \omega_0 - \omega$.

Если измерения проводятся при ω , близком к ω_0 и при $\beta = 1$ (рис. 2, в), то $B_{\max 2} \approx B_{\max 1}$, и непосредственно получается амплитудная зависи-

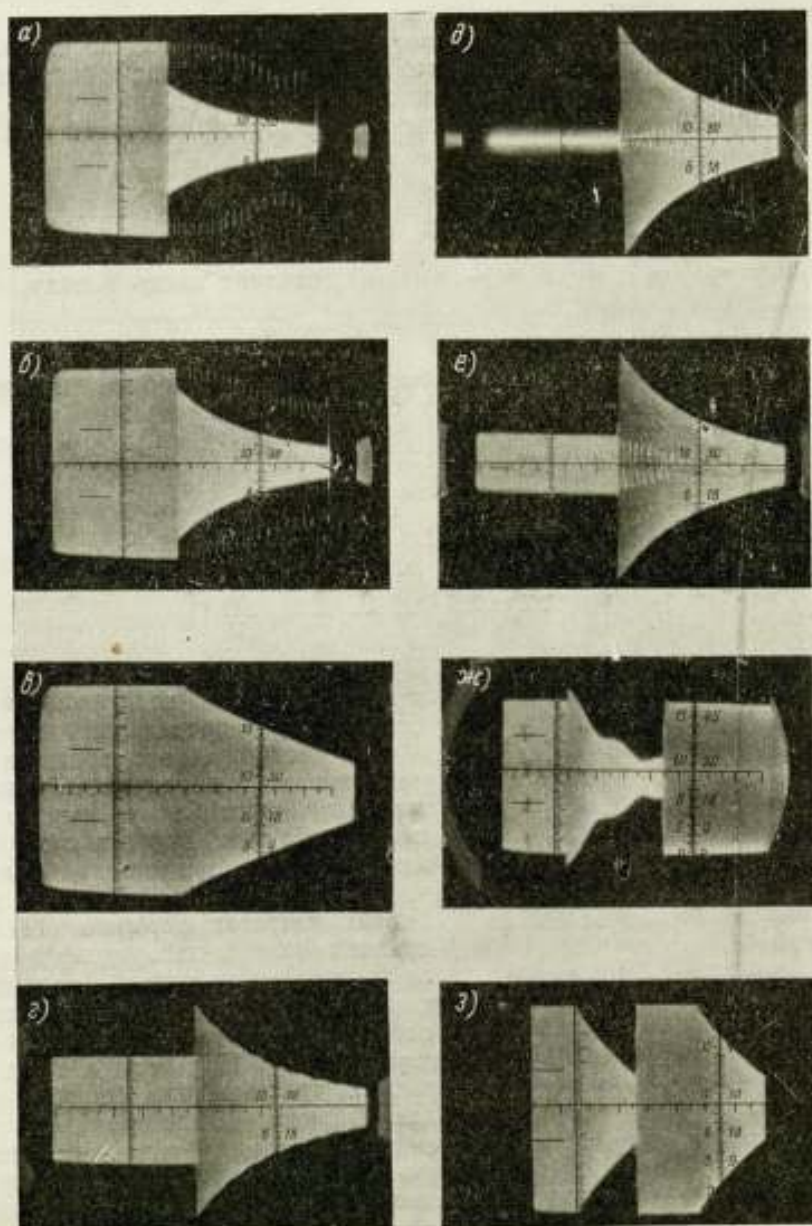


Рис. 2. Осциллограммы радиопульсов, полученные для образца магнито-
стрикционного феррита ($f_0 \approx 50$ кГц) при частотах возбуждения, близких
к резонансной:

а - $f < f_0$; $\beta = 0,5$; б - $f < f_0$; $\beta = 0,8$; в - $f < f_0$; $\beta = 1$; г - $f < f_0$; $\beta = 2$; д - $f = f_0$; $\beta = 1$; е - $f > f_0$;
 $\beta = 4$; ж - $f > f_0$; $\beta = 1,17$; з - $f > f_0$; $\beta = 1$.

мость k . Поскольку прямо измерить ω_0 при $B_{\max} > 100$ гс не представляется возможным из-за сильных искажений и опасности разрушения образца, величина k может быть вычислена либо по измеренным частотам ω_1 и ω_2 , соответствующим заданному значению β , либо по частотам ω_{11} и ω_{12} , соответствующим значениям β_1 и β_2 . Приводим окончательные формулы, которые легко получаются из формул (10) и (11). В случае необходимости можно пользоваться более точной формулой (11).

Случай 1. $\omega_2 = \omega_1 < \omega_0$; $\omega_1 = \omega_2 > \omega_0$; $\beta_1 = \beta_2 = \beta$;

$$k^2 \approx \beta \frac{\omega_1}{\omega_0} \left[1 - \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} \right)^2 \right] = \beta \frac{\omega_2}{\omega_0} \left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_0} \right)^2 \right] \approx \frac{2\beta}{\omega_0}, \quad (16)$$

где $2\beta = \omega_1 - \omega_2 \ll \omega_2$; $\omega_0 \approx \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2)$ (следует иметь в виду, что измерения на частоте ω_0 при больших B_{\max} весьма затруднительны).

Случай 2. $\omega_2 < \omega_1 < \omega_0$.

Для определения ω_0 при больших B_{\max} удобнее производить измерения при частотах, лежащих ниже резонанса.

Если положить $\delta = \omega_1 - \omega_2$; $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$; где β_1 ; β_2 — отношения амплитуд $\frac{U_{\max 2}}{U_{\max 1}}$, соответствующих частотам ω_1 и ω_2 , то

$$\omega_0 \approx \omega_2 \left[1 + \frac{\delta}{\omega_2} \cdot \frac{\beta_1}{\Delta\beta} - \frac{3}{2} \left(\frac{\delta}{\omega_2} \right)^2 \cdot \frac{\beta_1 \beta_2}{(\Delta\beta)^2} \right]; \quad (17)$$

$$k^2 \approx \frac{\beta_1 \beta_2}{\Delta\beta} \frac{\delta}{\omega_2} \left[1 + \frac{\delta}{\omega_2} \left(\frac{3}{4} - \frac{2\beta_1}{\Delta\beta} \right) \right]. \quad (18)$$

Как указывалось [формулы (1), (3), (4)], при больших B_{\max} вынуждающая магнитострикционная сила является полигармонической.

Однако при проведении измерений вблизи частоты ω_0 это обстоятельство не вызывает необходимости в изменении полученных формул, так как высшие гармоники вынуждающей силы не изменяют существенно величину упругой силы. При измерениях же на низких частотах формула (14) дает, строго говоря, некоторое эффективное значение динамических параметров, характеризующее колебания как на основной частоте, так и на высших гармониках.* При этом следует учитывать, что даже при больших B_{\max} коэффициент электромеханической связи k^I по первой гармонике при оптимальной поляризации остается значительно большим, чем коэффициенты k^n по высшим гармоникам.

Установка для измерений по импульсному методу, применявшаяся первоначально при измерениях вблизи резонанса и описанная в работе [1], имела ряд недостатков, ограничивавших область использования метода. Импульсный задающий генератор не обеспечивает постоянство фазы напряжения в момент окончания радиоимпульса, поэтому невозможно было проводить измерения при $\omega \ll \omega_0$ [формулы (13), (14)].

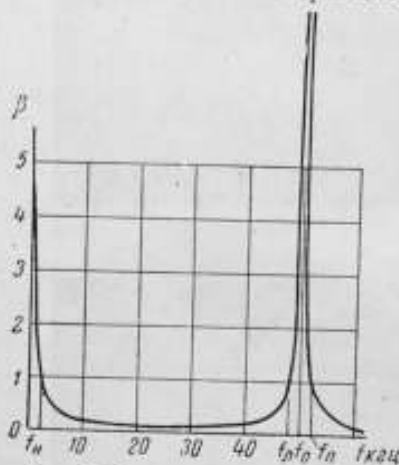


Рис. 3. Частотная зависимость от-
ношения $\beta = \frac{U_{\max 2}}{U_{\max 1}}$ для образца
феррита ($f_0 \approx 50$ кГц).

* $k_{эфф} \approx \sqrt{(k^I)^2 + (k^{II})^2 + \dots}$

Кроме того, при больших индукциях возбуждения невозможно обеспечить одновременно условия синусоидальности индукции и отсутствия влияния низкоомной обмотки выходного трансформатора усилителя мощности на магнитострикционные колебания образца.

Действительно, выполнение первого условия сводится к снижению до минимума величины электрического полного сопротивления R , включенного последовательно с обмоткой возбуждения, а выполнение второго условия — к максимальному увеличению этого импеданса.

Поэтому представляет большой практический интерес создание специальной импульсной установки, формирующей радиоимпульсы непосредственно на выходе усилителя мощности путем размыкания цепи обмотки возбуждения образца. При этом отпадает необходимость в последовательном сопротивлении R , что дает возможность наилучшим образом согласовать выход усилителя с нагрузкой. Установка должна обеспечивать регулировку и стабилизацию фазы среза радиоимпульса, плавную регулировку частоты заполнения и формирование радиоимпульсов заданной длительности и частоты повторения.

Блок-схема установки, разработанной с учетом изложенных соображений, приведена на рис. 4 [3].

С задающего генератора G , в качестве которого использован серийный генератор типа ЗГ-12, сигнал поступает в два канала: канал возбуждения образца и канал управления ключевым элементом.

В канал возбуждения входит фазовращатель ΦB , собранный по мостовой схеме [2], стандартный усилитель мощности $УМ$, например, типа ТУ-600, и обмотка возбуждения образца с последовательно включенным электронным ключевым элементом $ЭК$, работающим по принципу «электронных ворот», или контактной пары.

Схема ключевого элемента на транзисторе обеспечивает работу с большими токами (до 5—8 а пикового значения). Она аналогична ключевой мостовой схеме на диодах, обладая коэффициентом передачи в состоянии «замкнуто» близким к единице, но в отличие от указанной схемы, управляется меньшим током, так как транзистор в режиме насыщения может иметь коэффициент усиления по току, превышающий единицу. По-видимому, требования, предъявляемые к ключу, не могли бы быть выполнены при использовании электронных ламп.

Важнейшим элементом цепи управления ключевым элементом является двухканальное пересчетное устройство $ПУ$, собранное в блоке с источником питания и обеспечивающее независимое регулирование длительности и частоты повторения возбуждающих импульсов.

Пересчетное устройство запускается от амплитудного дискриминатора (триггера Шмидта) $АД$. На вход триггера через буферный каскад $БК$ подан управляющий сигнал от задающего генератора G , который снимается со второго каскада генератора типа ЗГ-12 (до делителя «регулировка напряжения»). Это дает возможность подавать в канал

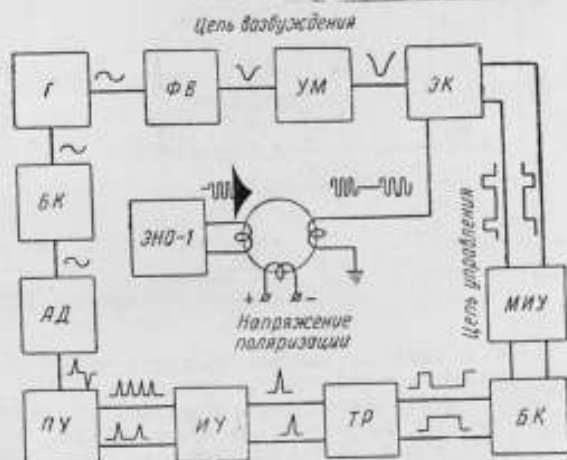


Рис. 4. Блок-схема установки для измерений по импульсному методу.

управления напряжением неизменной амплитуды при изменении амплитуды в канале возбуждения, осуществляемом регулированием напряжения на выходе генератора ЗГ-12.

Импульсы с выходов пересчетной схемы ПУ подаются на импульсный усилитель ИУ, затем — на триггерную схему ТР формирования запирающих и отпирающих видеоимпульсов, передний и задний фронты которых задаются установкой коэффициента пересчета в соответствующих каналах ПУ. Сформированные импульсы, пройдя через буферный каскад БК, вновь усиливаются мощным импульсным усилителем МИУ и поступают в цепь управления ключевым элементом ЭК.

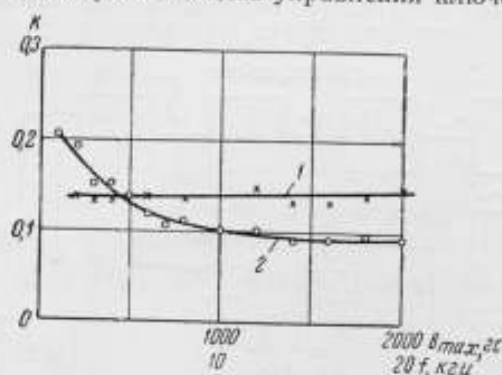


Рис. 5. Графики частотной и амплитудной зависимости коэффициента электромеханической связи образца феррита:
1 — $k = F_1(f)$; $V_{\max} = 100$ гс; $f_0 = 75$ кГц; 2 — $k = F_2(V_{\max})$; $f_1 = 4$ кГц; $f_0 = 48$ кГц.

ния β и частоты ω . Однако в непосредственной близости к частоте, соответствующей $\beta=1$ (вблизи ω_0), наблюдаются бienia, затрудняющие некоторые измерения (бienia исчезают при $\beta=1$; рис. 2, в и ж).

Импульсная установка обеспечила измерение динамической прочности ферритов, а также измерения амплитудной и частотной зависимости коэффициента электромеханической связи k , ранее не проводившееся. Графики этих зависимостей для образца Ni—Zn—Co феррита приведены на рис. 5. По-видимому, имеется возможность дальнейшего усовершенствования установки, в частности, за счет создания специального индикаторного устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сыркин Л. Н., Шамовская М. А., Пивигина Г. Н., Сборник «Ферриты», изд. АН БССР, 1960, стр. 441.
2. Сыркин Л. Н., Физика твердого тела, т. 2, № 8, 1960, стр. 1900.
3. Василевская Э. С., Сыркин Л. Н., Устройство для измерения динамических параметров магнитоэлектрических материалов, Авторское свидетельство по заявке № 740412/26—10 от 31 июля 1961 г.

СОДЕРЖАНИЕ

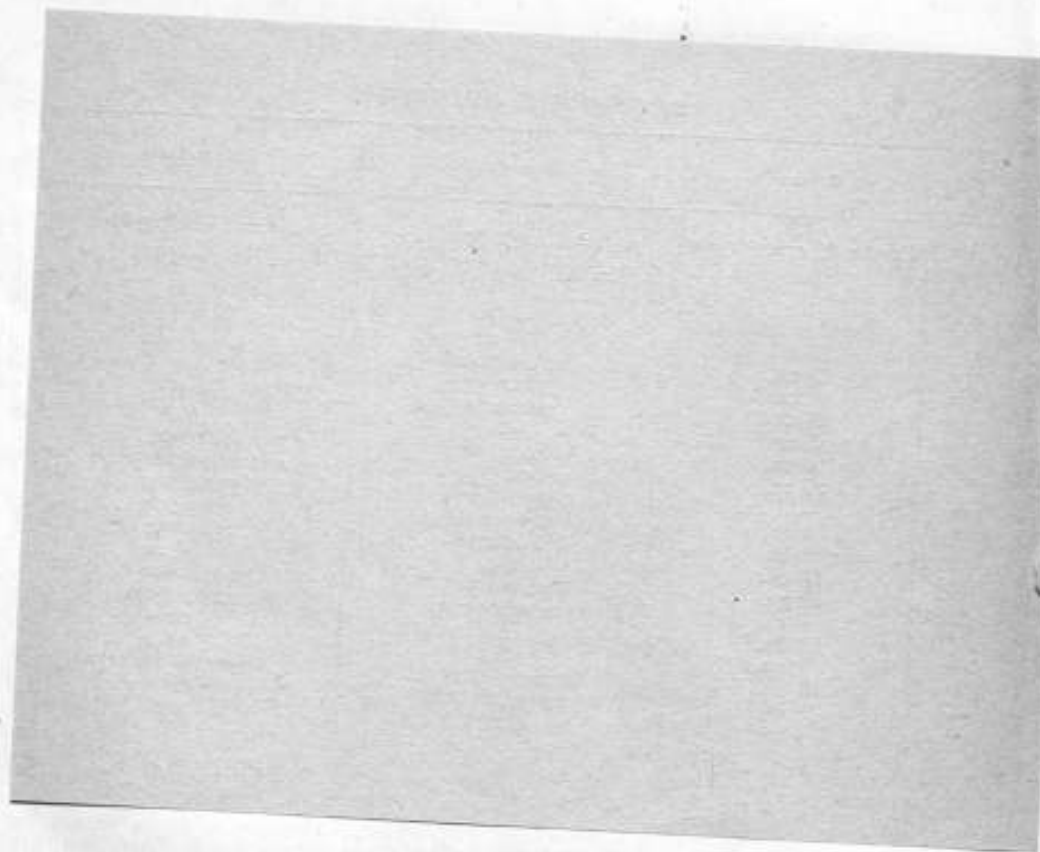
	Стр.
Предисловие	3
Е. Г. Шрамков. Задачи, связанные с оценкой свойств ферромагнитных материалов	5
Н. Г. Чернышева. Методика измерений и аппаратура в ГОСТ на магнитные материалы	9
О. Н. Альтгаузен. Вопросы измерительной техники, связанные с контролем свойств магнитных материалов	18
И. М. Рожановский. К определению и унификации магнитных характеристик материалов в переменных магнитных полях	27
Б. Е. Кубышин. Определение характеристик одновременного намагничивания ферромагнитных материалов для расчета магнитных усилителей	39
Н. А. Семенова. Исследование импульсов в цепи гальванометра при баллистических измерениях параметров сплавов типа пермаллой	49
О. Н. Альтгаузен. К методике определения начальной проницаемости современных магнитномягких сплавов	55
Г. Л. Горюштин. Феррометр для повышенных частот	60
М. Э. Левин. Установка типа У5011 для определения потерь в листовых материалах при частотах до 1000 гц	65
Ю. А. Вдовин, Р. И. Янус. Автоматизированный контроль магнитных свойств листового электротехнического железа в производственном потоке	70
В. Т. Печенев. Методы испытаний и требования к качеству холоднокатаной стали, применяемой для мощных трансформаторов	75
В. В. Дружинин. Измерение удельных потерь и магнитной индукции по ГОСТ 802—58 в целых и полудельных листах	81
А. Э. Векслер. Определение кривой намагничивания электротехнической стали в слабых и средних полях	85
А. Н. Ткаченко. Фотокомпенсационный микровольтампервеберметр Ф-18	90
Н. С. Бабенко, П. П. Тазько-Гринцевич, Н. Л. Яцынина. Методика и аппаратура для испытания малых образцов магнитномягких материалов на постоянном токе	93
П. П. Маркин. Электронный баллистический гальванометр	100
Т. С. Журавлева. Гальваномагнитные явления и их применение в технике магнитных измерений	103
Н. Е. Федралева, С. Г. Таранов. Использование эффекта Холла в устройствах для испытания ферромагнитных материалов	111
21 Зак. 3/71	321

	Стр.
П. Д. Горецкий, О. Н. Румянцева. Об опыте автоматического измерения напряженности магнитного поля постоянных магнитов с помощью датчика Холла	115
И. И. Пеккер, В. Н. Титаренко. Некоторые вопросы технического контроля постоянных магнитов	118
И. И. Пеккер, А. Д. Доманов, Н. Ф. Шмойлов, А. Н. Комов. Автомат для разбраковки постоянных магнитов по магнитным свойствам	123
А. Н. Комов. Частотно-избирательный фазочувствительный усилитель к автомату для разбраковки постоянных магнитов	130
А. В. Миткевич, Е. Г. Шрамков. Аппаратура для исследования стабильности магнитных систем с постоянными магнитами	134
П. П. Маркин, И. И. Пеккер. Ферротестер для постоянных магнитов	139
Е. Т. Чернышев, Е. Н. Чечурин, Н. Г. Чернышева, И. А. Оралова. Работы ВНИИМ в области создания методики и аппаратуры для испытания нормальных образцов ферромагнитных материалов на переменном токе	145
Е. А. Будницкая, С. М. Нижний. Установка для определения магнитных характеристик материалов при частотах до 10 кгц	160
И. И. Кифер, М. С. Цепляева. К вопросу о магнитных характеристиках материалов, работающих в сложных условиях намагничивания	168
А. М. Ликсонов. Метод определения кривой намагничивания при различных температурах	172
Б. С. Соколов. Установка для контроля зависимости магнитной проницаемости от температуры	176
Л. В. Мительман. Двухкоординатная широкополосная установка типа ДСШУ-М для записи кривых намагничивания ферромагнитных материалов в динамическом режиме	179
П. П. Маркин, И. И. Пеккер. Установка для испытания магнитно-мягких материалов	187
Т. И. Васюткина, В. М. Юрченко. Исследование ферритовых сердечников в квазистатическом режиме	191
О. А. Геращенко, П. И. Дехтяренко, В. П. Карпенко. Анализ схем автоматического регулирования дифференциального калориметра	197
А. Л. Грохольский. Измеритель магнитных характеристик материалов в диапазоне частот 10 кгц + 20 Мгц с коаксиальным держателем	208
А. Л. Грохольский, А. Ф. Кугаевский. Устройства для измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов в диапазоне частот 10 кгц + 750 Мгц	214
Б. С. Соколов. Измерение магнитной проницаемости и одновитковой индуктивности методом замещения	218
Э. М. Мушкарден, Г. А. Шевцов. Прибор для измерения комплексной магнитной проницаемости ферритов в диапазоне радиочастот	223
Л. И. Рабкин, Н. П. Горячев. Импульсные испытания ферромагнетиков	228
Е. И. Гурвич, Л. Б. Щукин. О выборе системы параметров и методов испытания больших количеств ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса, используемых в цифровых автоматических устройствах	233
А. З. Векслер. Установка для измерения кривой намагничивания в импульсном режиме	243
Ю. И. Визун. Аппаратура для исследования импульсных свойств магнитных сердечников	250
В. Г. Михалев, Л. Л. Мохель. Прибор для изучения импульсных параметров легочных сердечников переключающих устройств	257
А. В. Зырин, Л. Н. Тульчинский. Особенности магнитных измерений параметров ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса	270

	Стр.
К. М. Поливанов, А. Л. Фрумкин. Некоторые вопросы методики исследования магнитных свойств тонких магнитных пленок в статическом и квазистатическом режимах	278
В. В. Кобелев. Аппаратура для наблюдения петель гистерезиса магнитных элементов с весьма малым остаточным потоком	289
А. А. Корсунский. Установка для изучения доменной структуры ферромагнитных пленок	300
В. А. Кадкин. Магнитометр с вибрирующей катушкой	305
Э. С. Василевская, Л. Н. Сыркин, М. А. Шамовская. Методика и аппаратура для измерения динамических магнитоострикционных параметров	311

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
15	Графа 2, стр. 16 сн.	$\mu_a f = 1 \text{ кгц}; \text{tg } \delta$ $(f = 100 \text{ кгц}) H_c; \mu H_c$	$\mu_a (f = 1 \text{ кгц}); \text{tg } \delta$ $(f = 100 \text{ кгц}); H_c; \mu H_c$
37	Формула (30)	$-j_2'$	$-j_{\mu_2}'$
42	12 сн.	100 гц	1000 гц
166	2 сн.	мощностью	мощности
178	1 сн.	Ω	Ψ
184	19 сн.	выходы	входы
197	5 сн.	C	P
205	4 сн. 16 сн.	которая температуры	которое над температурой
207	11—12 сн.	усилителя	усиления
228	9 сн.	вопросом	вопросы
231	15 сн.	1 мксек	10 мгц
234	11 сн.	H_{max}	$H_{\text{max}} =$
235	16 сн.	не могут	и не могут
274	4 сн. 12 сн.	измерении E_B	изменении ϵ_B
275	1 сн.	E_B	ϵ_B
292	6 сн.	блоке и каскаде	блоке, и каскада
293	14 сн.	измеряемости	измеряемой
302	4 сн.	Уголь	Угол



Редактор издательства *Н. Н. Александрова*

Техн. редактор *Р. Г. Польская*

Корректор *Л. Н. Кири*

Подписано к печати 21/V-62

Уч.-изд. л. 27,9

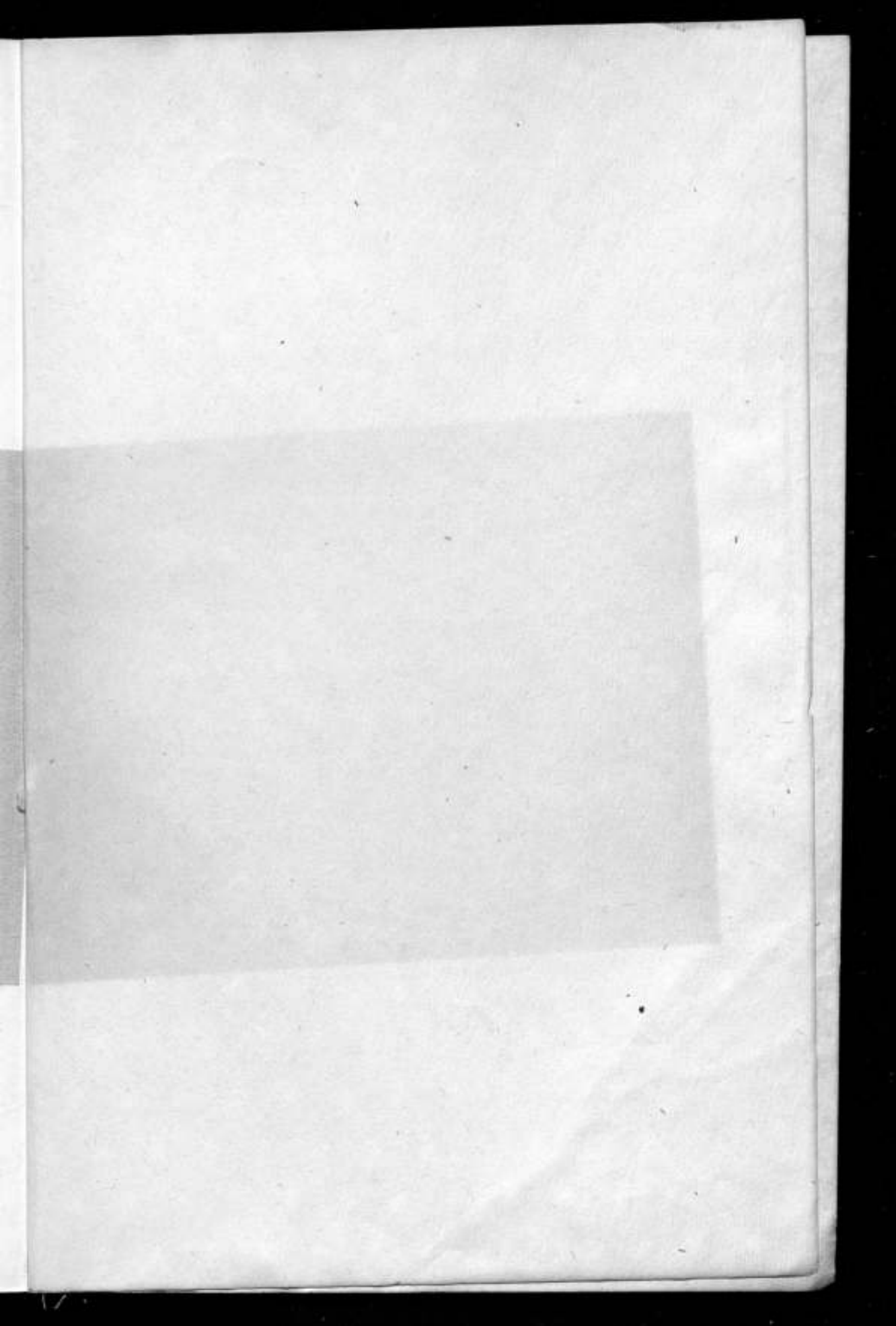
Формат бумаги 70×108^{1/16}

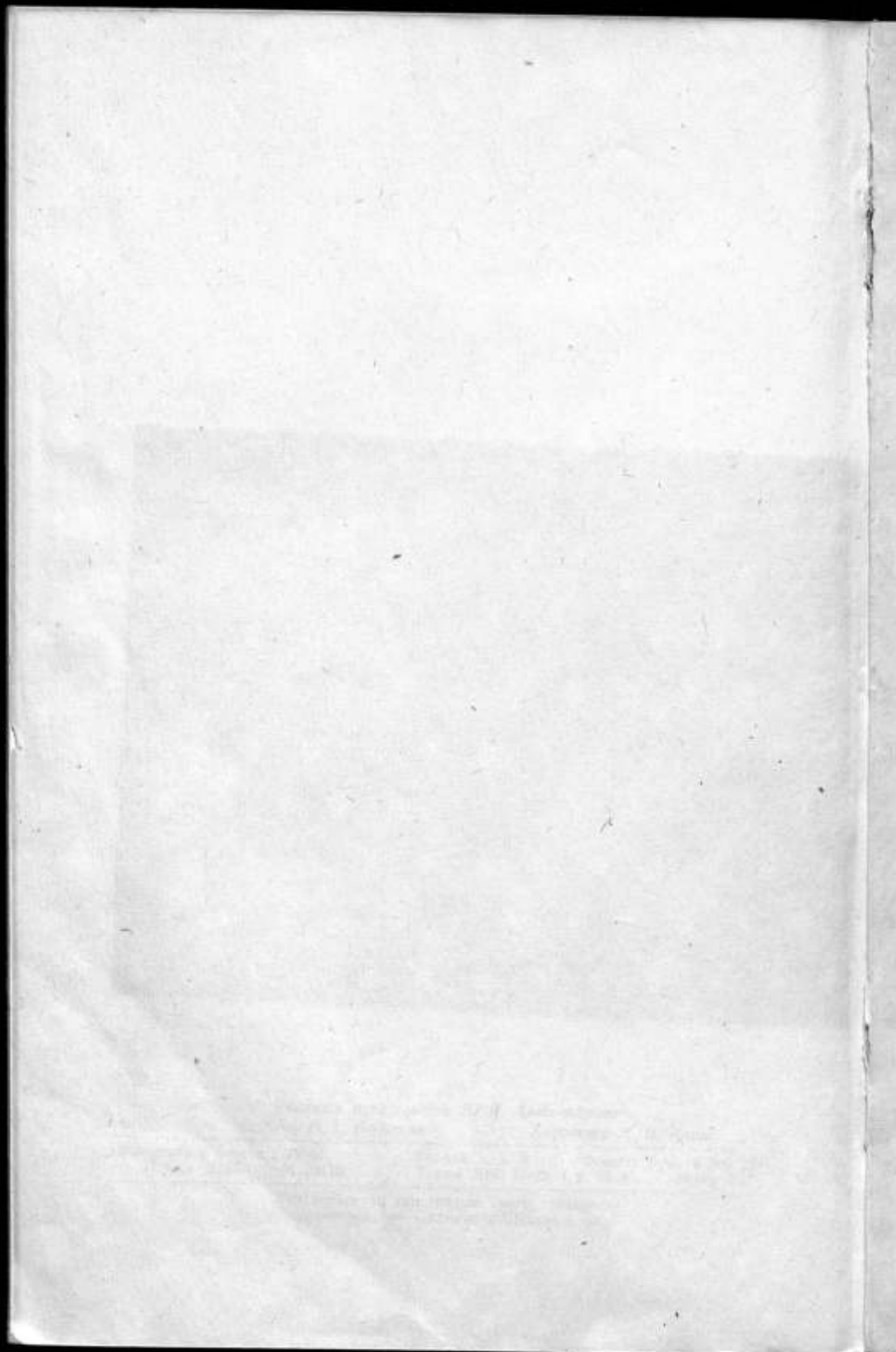
Печ. л. 20,25 М 39418

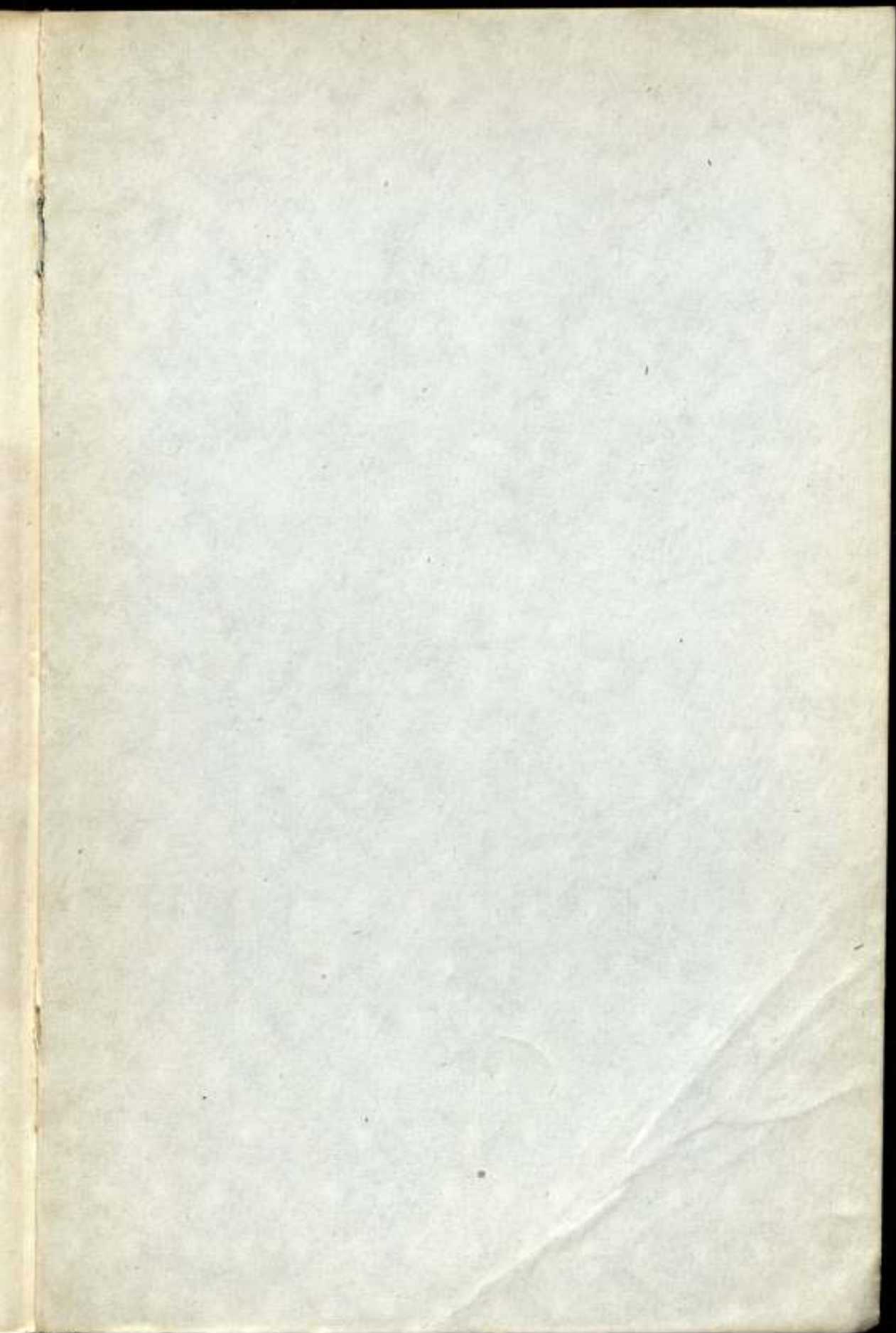
Тираж 2000 Цена 1 р. 95 к.

Заказ 3/71

Ленинградская типография Госгортехиздата.
Ленинград, ул. Салтыкова-Щедрина, 54.







Цена 1 р. 95 к.