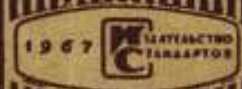


ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

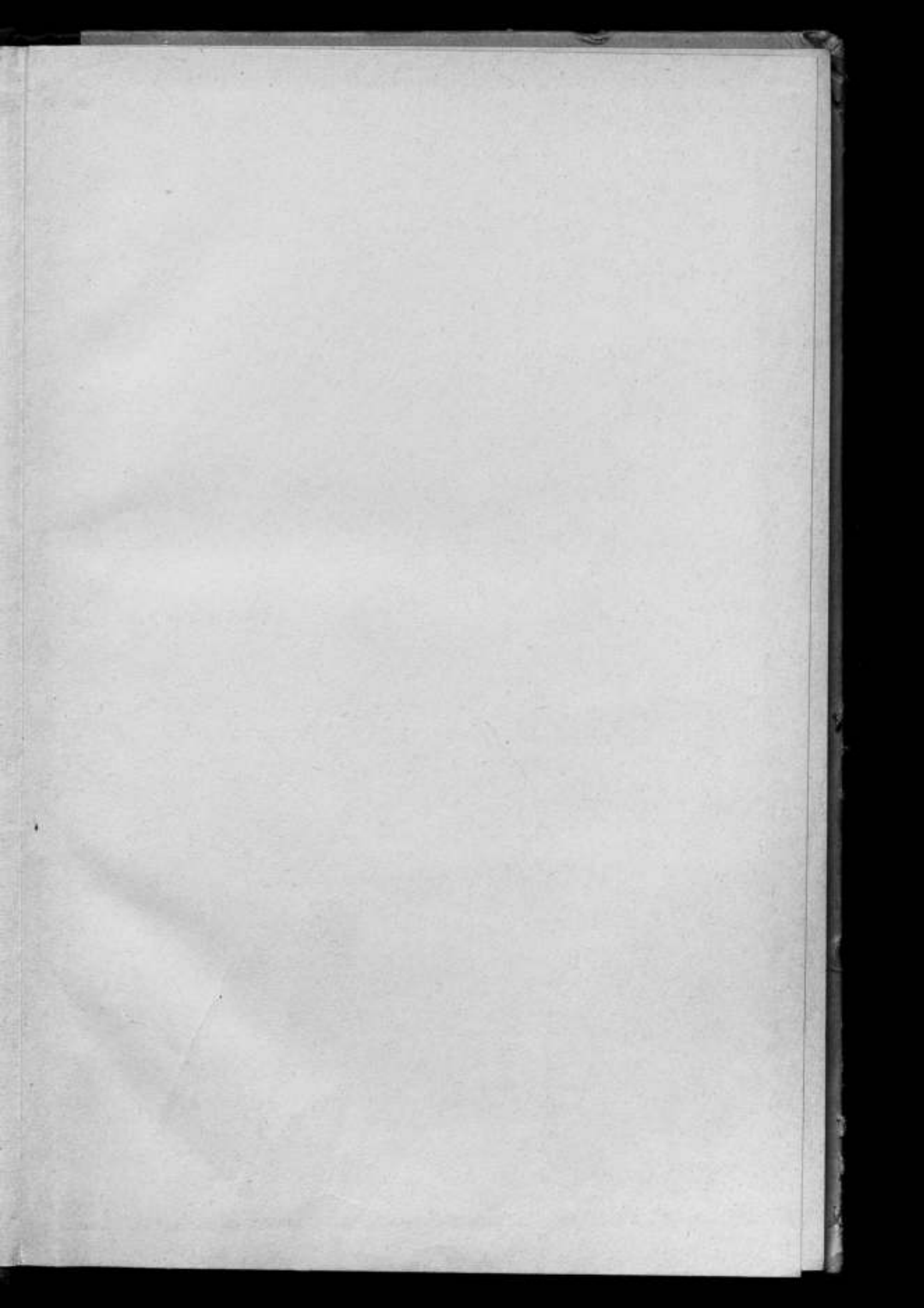
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
И ПУТИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ  
И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

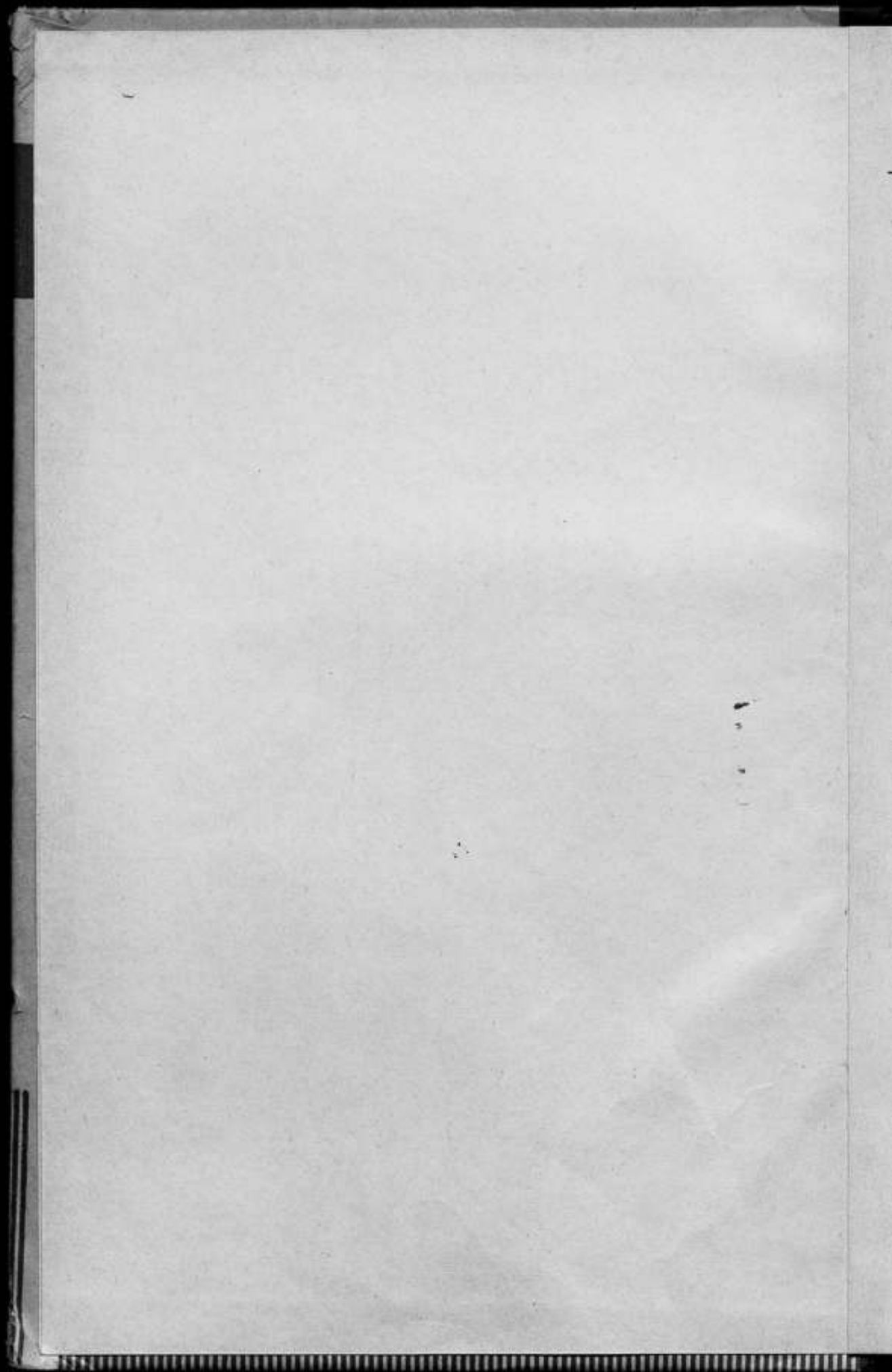
ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 95 (155)









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

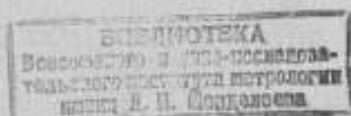
---

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
И ПУТИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ  
И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 95 (155)

*Под редакцией*  
канд. техн. наук Н. Г. ЧЕРНЫШЕВОЙ  
и д-ра техн. наук проф. Е. Г. ШРАМКОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

1967

ТРУДЫ ВТОРОГО НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СОВЕЩАНИЯ  
«ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ  
НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Ответственный редактор

д-р техн. наук проф. *В. О. Арутюнов*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время одной из важнейших задач страны является повышение качества и надежности выпускаемой продукции, наряду с повышением ее рентабельности, до уровня, соответствующего лучшим мировым стандартам. В решении этой задачи большая роль отводится разработке и получению широко применяемых в различных механизмах, приборах и устройствах материалов, в том числе и ферромагнитных.

Успех получения высококачественных ферромагнитных материалов, удовлетворяющих современным требованиям науки и техники в отношении многообразия и стабильности их физических свойств, а также однородности характеристик материала данного вида и марки, в значительной степени зависит от контроля этих свойств в процессе производства металла, при сдаче готовой продукции потребителю и разработке новых видов материалов. Создавая новые виды изделий из ферромагнитных материалов, необходимо всесторонне их исследовать, чтобы получить достоверные характеристики.

Естественно, что для осуществления указанных задач требуется оснащение соответствующих организаций апробированной магнитоизмерительной аппаратурой.

В феврале 1965 г. в Ленинграде состоялось Второе научно-техническое совещание по перспективным научно-техническим направлениям развития магнитоизмерительной аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов. Оно было организовано Всесоюзным научно-исследовательским институтом метрологии имени Д. И. Менделеева и Объединенной комиссией Совета по проблеме «Научное приборостроение» Госкомитета по координации научно-исследовательских работ СССР и Научно-технического совета Госкомитета по приборостроению, средствам автоматизации и системам управления совместно с Ленинградским областным правлением НТО приборостроительной промышленности.

Перед совещанием стояла задача — на основе анализа современного состояния в Советском Союзе и за рубежом вопросов методики и аппаратуры для исследования магнитных характеристик ферромагнитных материалов наметить перспективные научно-технические направления развития этой области приборостроения применительно к требованиям государственных стандартов и технических условий на магнитные материалы, для исследовательских целей, а также для получения надежных справочных магнитных характеристик различных ферромагнитных материалов. В связи с этим доклады на совещании носили в основном обобщающий характер, и лишь небольшая часть сообщений была посвящена отдельным, частным вопросам.

Рассмотрение методов и аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов требует предварительного установления электромагнитных характеристик этих материалов, а также условий их измерения. В соответствии с этим некоторые доклады обобщающего характера были посвящены магнитным характеристикам отдельных ферромагнитных материалов (листовой электротехнической стали, магнитотвердых материалов и др.), которые следует установить для оценки свойств материалов при приемо-сдаточных испытаниях (для стандартов и технических условий), а также справочным характеристикам. В других же содержались вопросы методики и аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов при определенных условиях намагничивания (переменное периодическое поле низких, звуковых и сверхзвуковых частот, импульсное намагничивание и др.) и для исследования определенных видов материалов (магнитотвердых материалов, ферритов и др.).

На совещании были сделаны также доклады, в которых совместно рассматривались характеристики материалов (например, тонких магнитных пленок, материалов с прямоугольной петлей гистерезиса и пр.) и методы и аппаратура для их определения.

Настоящий сборник содержит тексты этих докладов и сообщений. По своей тематике все доклады сгруппированы в три раздела. В первых двух разделах рассмотрены статические и динамические (при намагничивании периодическим магнитным полем) магнитные характеристики соответственно магнитномягких и магнитотвердых материалов, включая постоянные магниты, а также методы и аппаратура для определения этих характеристик. Третий раздел посвящен магнитным характеристикам материалов, применяемых при импульсном намагничивании, характеристикам тонких магнитных пленок, методам и аппаратуре для их определения.

Последние две статьи сборника посвящены вопросам, связанным с возможными путями автоматизации измерительных устройств для изучения магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

В сборник не включен доклад В. И. Зингермана об аппаратуре с импульсным намагничиванием для испытания магнитотвердых материалов, с содержанием которого можно ознакомиться в статье Г. К. Яголы, В. И. Зингермана, М. И. Грабовицкого и В. Н. Сепетого «Методика испытания образцов магнитотвердых материалов при импульсном намагничивании», опубликованной в журнале «Измерительная техника», 1965 г. № 1.

РЕДАКТОРЫ



СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ  
(ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ПЕРИОДИЧЕСКИМ  
МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ) МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДЫ  
И АППАРАТУРА ДЛЯ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

УДК 669.14 : 620.168.37

О. Н. АЛЬТГАУЗЕН

О ВЫБОРЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАГНИТНОМЯГКИХ СПЛАВОВ ДЛЯ НОРМАТИВНЫХ  
ДОКУМЕНТОВ И В КАЧЕСТВЕ СПРАВОЧНЫХ

Магнитномягкие материалы, выпускаемые металлургической промышленностью, могут быть подразделены на следующие основные группы\*:

1. Железоникелевые сплавы с повышенной магнитной проницаемостью, высокой индукцией насыщения — до 1,5 тл (45Н и 50Н)\*\*, применяемые для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих при повышенной индукции в переменных полях, в том числе и с подмагничиванием.

2. Сплавы с высокой максимальной магнитной проницаемостью, кристаллографической или магнитной текстурой и прямоугольной петлей гистерезиса при индукции 1,15—1,5 тл (50НП, 65НП, 34НКМП, 68НМП, 37НКДП и 35НКХСП). Из этих материалов изготавливают сердечники магнитных усилителей, коммутирующих дросселей, выпрямительных установок, элементов вычислительных аппаратов, счетно-решающих машин и т. д.

3. Сплавы с повышенной магнитной проницаемостью и высоким удельным электросопротивлением (50НХС, 38НС и 42НС). Их применяют для изготовления сердечников импульсных трансформаторов и аппаратуры связи звуковых и сверхзвуковых частот, работающих без подмагничивания и с подмагничиванием.

\* Электротехническая сталь, выпускаемая по ГОСТ 802—58 и ГОСТ 9925—61, не указана, так как она здесь не рассматривается.

\*\* Принятые обозначения: цифры указывают содержание основного легирующего элемента; буквы — легирующие элементы в сплаве (например, Н — никель; К — кобальт; М — молибден; Д — медь; Х — хром; С — кремний; Ю — алюминий и т. д.; буква П обозначает прямоугольную форму петли гистерезиса).

4. Железоникелевые сплавы с высокой магнитной проницаемостью в слабых полях, индукцией насыщения до 0,75 тл и малой коэрцитивной силой. К этой группе относят сплавы 79НМ, 80НМ, 80НХС, 76НХД, 74НМД и 77НМД, большую часть которых выпускают по ГОСТ 10160—62 и ГОСТ 10994—64. Из них изготавливают малогабаритные трансформаторы, дроссели, реле, магнитные экраны, а из лент малой толщины проката — сердечники импульсных трансформаторов, магнитных усилителей, бесконтактных реле, элементы вычислительных аппаратов, счетно-решающих машин и др.

5. Железоалюминиевые сплавы с высоким удельным сопротивлением, высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой (16ОЮ, 16ЮХ и 12ЮК). Они характеризуются высокой износ- и жаростойкостью и широко применяются для изготовления деталей звукозаписывающей аппаратуры.

6. Сплавы, предназначенные для изготовления сердечников катушек постоянной индуктивности резонансных контуров, фильтров и других элементов, работающих в диапазоне звуковых и сверхзвуковых частот без подмагничивания и с подмагничиванием. В настоящее время по техническим условиям выпускают сплав 47НК.

7. Сплавы с особым сочетанием магнитных свойств. Железоникель-кобальтовый сплав 33НКМС и электротехническую сталь ЭСТА с малыми удельными потерями при звуковых частотах применяют для изготовления высокочастотных трансформаторов; железокобальтовые сплавы 50КФ и 50КФА — для литых и кованных магнитопроводов (полюсные наконечники, плиты для магнитных систем и др.), сердечников силовых и импульсных трансформаторов (в виде пакетов, собранных из штамповок, или ленточных, в том числе и разрезных), мембран. Эта группа материалов характеризуется высокими значениями магнитной индукции насыщения, точки Кюри, обратной проницаемости и проницаемости в сильных полях.

8. Магнитоотрицательные сплавы с высокой магнитоотрицательной насыщением и низкой коэрцитивной силой — железокобальтовые 50КФ (ЭП207), К65 и железоалюминиевые 8Ю, 10Ю (текстурованные), 14Ю сплавы и чистый никель. Их используют для изготовления магнитоотрицательных преобразователей в аппаратуре гидроакустики, в ультразвуковых установках технологического применения, электромеханических фильтрах, линиях задержки, а также в механизмах для малых перемещений.

9. Термомагнитные сплавы, предназначенные для изготовления магнитных шунтов. В эту группу входят железоникельхромистые сплавы Н38Х14, Н30Х4, ЭП297, железоникельалюминиевый сплав Н33Ю и железоникельалюминий хромистый Н32Х6Ю.

В металлургической промышленности при сдаче магнитномягких сплавов производится проверка в соответствии со стандартами и техническими условиями химического состава, геометрических размеров и магнитных свойств сплава.

Ниже приведены магнитные характеристики сплавов, нормируемые в настоящее время и рекомендуемые для нормирования при составлении нормативных документов.

#### Магнитные характеристики сплавов, нормируемые государственными стандартами и техническими условиями

Контроль магнитных характеристик большей части магнитномягких сплавов производят в настоящее время при намагничивании в статическом режиме и измерении баллистическим методом. Лишь для сплавов 33НКМС и ЭСТА определяют потери при заданной частоте и индукции.

При выпуске сплавов металлургическими заводами контролируются и нормируются следующие магнитные характеристики.

Для сплавов 1—5-й групп: начальная  $\mu_{\text{нач}}$  и максимальная  $\mu_{\text{м}}$  магнитная проницаемость; коэрцитивная сила  $H_c$ ; индукция технического насыщения  $B_t$ . Для лент любой толщины, изготовленных из сплавов 2-й группы, и для лент толщиной 3—10 мкм из некоторых других сплавов определяют также прямоугольность петли гистерезиса — отношение остаточной индукции  $B_r$  к индукции технического насыщения  $B_t$ .

Характеристики  $\mu_{\text{нач}}$ ,  $\mu_{\text{м}}$ ,  $B_t$  целесообразно нормировать и в дальнейшем (при составлении новых нормативных документов); для сплавов 2-й группы следует нормировать как  $\frac{B_r}{B_t}$ , так и квадратность петли.

Для сплавов 6-й группы: отношения  $\frac{\mu_{\text{нач}}}{\mu_{\text{м}}}$  и  $\frac{B_r}{B_t}$  в поле напряженностью 800 а/м. Эти характеристики необходимо нормировать и в дальнейшем.

Для сплавов 7-й группы: для 50КФ и 50КФА нормируют индукцию насыщения в поле напряженностью не менее 120 ка/м (в дальнейшем необходимо также нормировать предельно допустимое значение коэрцитивной силы); для 50КФА, 33НКМС и ЭСТА — потери при заданной частоте и нескольких значениях индукции.

Для магнитоотрицательных сплавов 8-й группы: магнитоотрицательность насыщения  $\lambda_s$ , магнитная индукция при заданных значениях напряженности поля и коэрцитивная сила. При составлении новых технических условий или стандартов целесообразно, кроме указанных параметров, нормировать ход кривой зависимости величины магнитоотрицательности от индукции в области наибольшего наклона кривой к оси индукции  $\lambda = F(B)$ .

Для термомагнитных сплавов 9-й группы: верхний и нижний пределы значений индукции при 20° С и заданной напряженности поля в области, близкой к техническому насыщению; перепад индукции (разность значений индукции в заданном интервале температур). При составлении новой документации следует нормировать: а) гарантированный интервал температур, при которых работает сплав; б) гарантированное значение индукции (с допуском в сторону больших и меньших значений) при максимальной рабочей температуре; в) форму кривой изменения индукции под действием температуры при заданной напряженности поля  $B = F(t)$  или  $B - H\mu_0 = F(t)$  (в виде таблиц или графиков).

В случае линейной характеристики следует гарантировать изменение индукции при изменении температуры на 1° С (удельное температурное изменение индукции) с допусками.

#### О приемо-сдаточных испытаниях сплавов в переменных полях

В связи с тем, что большая часть изделий из магнитномягких сплавов работает в условиях намагничивания переменными полями, все чаще встает вопрос о разработке единой методики испытания сплавов в переменных полях и о составлении стандартов, в которых нормировались бы характеристики сплавов, измеренные в этих полях.

Анализ современного состояния разработки методики приемо-сдаточных испытаний для магнитномягких сплавов, по данным отечественной и зарубежной литературы и каталогов фирм, показал, что в большей части нормативных документов приведены типовые, или средние, или максимально и минимально допустимые характеристики, измеренные при намагничивании в статическом режиме. Из большого числа приведенных в литературе характеристик нормируется лишь незначительная часть. Данные

о намагничивании в динамическом режиме представляют собой справочный, подчас весьма обширный материал — графики и таблицы. Динамические характеристики приводятся для строго заданных форм и размеров образцов, способов их изготовления и испытания. Лишь в редких случаях нормируются потери при заданных значениях индукции и частоты, но только для конкретных образцов — сердечников.

Определение при статочных испытаниях характеристик, измеренных в статическом режиме намагничивания, неслучайно, так как при этом могут быть получены данные, зависящие только от свойств самого металла.

Магнитные характеристики в переменных полях лишь условно могут быть названы характеристиками материала. Они зависят как от магнитных свойств металла в статическом режиме намагничивания, так и от толщины материала в образце, частоты и метода измерения, формы кривых индукции и напряженности поля при измерении, наличия и величины высших гармоник.

Однако не всегда можно создать для образцов идентичные условия при испытании. Свойства образцов в динамическом режиме, помимо сказанного выше, зависят от свойств межвитковой или межпластинчатой изоляции и качества ее нанесения, методика контроля которых в готовых образцах еще не разработана. Не существует также ни аналитических, ни экспериментальных методов, позволяющих отделить при измерениях на переменном токе свойства образца, обусловленные качеством металла, от свойств, обусловленных качеством изготовления образца и характером электромагнитного процесса.

Задачей контроля характеристик магнитномягких сплавов на металлургическом заводе является контроль технологического процесса изготовления сплава данной марки в соответствии с техническими условиями.

Нормируемые магнитные характеристики позволяют судить о следующем. Величина  $B_s$  свидетельствует о соответствии химического состава сплава заданному. Величины  $\mu_{вн}$ ,  $\mu_{ж}$ ,  $H_c$  и определенное их сочетание характеризуют структуру сплава и степень ее упорядочения, внутренние напряжения, величину зерна и т. д. и свидетельствуют о точности проведения всего технологического процесса. Величины  $\mu_{вн}$ ,  $\mu_{ж}$  и  $\frac{B_r}{B_s}$  в сплавах

с прямоугольной петлей гистерезиса указывают на достижение для сплава данной марки необходимой степени кристаллографической или магнитной текстуры. Отклонение от нормируемых характеристик указывает на нарушение технологии производства сплава.

Как уже было сказано, существующая в настоящее время практика определения магнитных свойств в статическом режиме намагничивания не удовлетворяет потребителей сплавов. В динамическом режиме намагничивания потребителю приходится приспособлять сплав каждой марки для работы в специфической аппаратуре — опробовать сплавы разных марок, имея при этом только общие представления о порядке их выбора. Естественно, что потребителю желательно было бы получить от изготовителя металл с характеристиками, измеренными в режиме, близком к режиму работы изделий. Отсюда и требования перехода к испытаниям в динамическом режиме, а также предложения о порядке измерений.

Магнитномягкие сплавы находят применение в аппаратуре различного назначения, работающей в широком интервале частот, индукций, напряженностей поля, в том числе и в сложных условиях намагничивания. Контрольно-статочные испытания во всех режимах намагничивания на металлургических заводах невозможны. Вероятно, для получения оптимальных для каждого потребителя характеристик металла на заводе пришлось бы разрабатывать каждый раз технологический процесс изготовле-

ния как металла, так и образцов для измерений. Однако оптимальный для данного потребителя вариант не был бы оптимальным для других.

Поскольку в настоящее время еще нет обоснованных данных для выбора определенного режима намагничивания, нам кажется целесообразным сохранить как основной контрольный метод определения магнитных свойств магнитномягких сплавов в статическом режиме, широко развернув в то же время работы по их исследованию в динамическом режиме намагничивания. В результате этого должны быть созданы каталоги характеристик сплавов в различных режимах намагничивания, которые позволят при разработке аппаратуры более рационально выбирать материалы.

### Характеристики магнитномягких сплавов, рекомендуемые для каталогов

#### А. Физические и механические характеристики

1. Удельный вес.
2. Удельное электрическое сопротивление.
3. Точка Кюри.
4. Магнитострикция насыщения.
5. Теплоемкость.
6. Теплопроводность.
7. Коэффициент линейного расширения.
8. Предел прочности.
9. Относительное удлинение.

#### Б. Магнитные характеристики в статическом режиме намагничивания

Для сплавов 1—7-й групп, помимо данных стандартов и технических условий, должны быть приведены следующие графические данные:

1. Основные кривые намагничивания  $B = F(H)$  (с указанием типовых кривых и верхних и нижних пределов кривых).
2. Кривые зависимости проницаемости от величины индукции  $\mu = F(B)$  и напряженности поля  $\mu = F(H)$ .
3. Семейство петель гистерезиса (с указанием удельных потерь на гистерезис).
4. Типовые кривые зависимости удельных потерь на гистерезис от индукции  $p_r = F(B)$  и напряженности поля  $P_r = F(H)$ .
5. Типовые кривые зависимости максимальной (для данной петли) индукции, остаточной индукции, прямоугольности петли и коэрцитивной силы от напряженности намагничивающего поля.
6. Кривые зависимости типовых магнитных свойств от толщины ленты сплава.
7. Для сплава 50КФ — зависимость обратимой проницаемости от напряженности поля.
8. Для магнитострикционных сплавов — графики зависимости магнитострикции от величин напряженности поля  $\lambda = F(H)$  и индукции  $\lambda = F(B)$  и основная кривая намагничивания  $B = F(H)$ .
9. Для термомангнитных материалов — семейство кривых зависимости индукции от температуры при разных напряженностях намагничивающего поля (от 800 а/м до 160 ка/м) и температурах (от  $-60^\circ\text{C}$  до температуры точки Кюри).

Для сплавов 1—7-й групп, работающих в широком интервале температур, целесообразно также указать магнитные характеристики для следующих интервалов температур:

а)  $(-60) \rightarrow (+100)^\circ \text{C}$  — все нормируемые характеристики и выборочно из помещаемых в каталог;

б) от  $-196^\circ \text{C}$  до температуры точки Кюри для типовых кривых намагничивания и зависимости удельных потерь от индукции.

### *В. Магнитные характеристики в динамическом режиме намагничивания*

В каталоге целесообразно привести данные для строго стандартизованных образцов с изоляцией, обеспечивающей отсутствие контакта между соседними слоями металла.

В настоящее время для испытания образцов в динамическом режиме применяют обычно два основных способа намагничивания: при синусоидальной индукции и при синусоидальной напряженности поля. Применяется также и одновременное наложение постоянного и переменного полей — работа с подмагничиванием. Более сложные условия намагничивания — наложение двух или нескольких переменных полей — встречаются сравнительно редко. Выбор условий испытаний в таких случаях зависит от конструкции сердечника в каждом частном случае и здесь рассматриваться не будет.

При указанных выше двух основных способах намагничивания кривые зависимости  $B = F(H)$ ,  $\mu = F(H)$ ,  $\mu = F(B)$  и параметры динамической петли — удельные потери  $p$ ,  $B_c$  и  $H_c$  — при идеальной изоляции слоев металла и заданной толщине ленты сплава существенно зависят от способа намагничивания, частоты, формы и размеров образцов (последнее особенно важно для сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса). То же можно сказать и об одновременном намагничивании постоянным и переменным полями (смешанный режим).

При рассмотрении магнитных характеристик в динамическом и смешанном режимах намагничивания была сделана попытка выделить основные характеристики для каждой группы сплавов, однако это не удалось, так как каждый сплав или группа сплавов не только применяется в различной аппаратуре, но и в однотипной аппаратуре применяют разные сплавы.

В качестве примера укажем материалы, используемые для изготовления различных типов магнитных усилителей:

а) электротехническая сталь горячекатаная Э31, Э41, Э42, Э45, Э46, Э47, Э48, холоднокатаная Э310, Э320, Э330, Э340, Э360, Э380;

б) железоникелевые 76НХД, 79НМ, 79НМА, 80НХС и текстурованные 50НП, 65НП, 68НМП, 34НКМП, 37НКМП, 35НКХСП сплавы.

Нам кажется целесообразным провести более широкое исследование всех сплавов, выделив, быть может, только магнитострикционные и термомагнитные сплавы.

Для сплавов 1—7-й групп целесообразно привести характеристики в виде таблиц и графиков.

При синусоидальной кривой индукции и фиксированных частотах:

1. Кривые намагничивания  $B_m = F(H_m)$ , где  $B_m$  и  $H_m$  — соответственно амплитудные значения индукции и напряженности поля.

2. Зависимость магнитной проницаемости от амплитуды магнитной индукции

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} = F(B_m).$$

Эти характеристики могут быть получены и с подмагничиванием.

3. Кривые намагничивания  $B_m = F(H)$ , где  $H$  — действующее значение напряженности поля.

4. Зависимость магнитной проницаемости, определяемой как отношение  $B_m$  к  $H$ , от индукции

$$\mu_{-d} = \frac{B_m}{H} = F(B_m).$$

5. Кривые намагничивания  $B_m = F(H_{1m})$ , где  $H_{1m}$  — амплитуда первой гармоники напряженности поля.

6. Зависимость магнитной проницаемости, определяемой по первой гармонике напряженности поля, от индукции

$$\mu_{-1} = \frac{B_m}{H_{1m}} = F(B_m).$$

7. Кривая намагничивания  $B_m = F(H_B)$ , где  $H_B$  — составляющая напряженности поля, находящаяся в фазе с индукцией.

8. Зависимость магнитной проницаемости, определяемой по составляющей поля, которая находится в фазе с индукцией, от величины последней

$$\mu_B = \frac{B_m}{H_B} = F(B_m).$$

9. Семейство динамических петель при фиксированных индукциях (с указанием суммарных потерь).

10. Кривые зависимости удельных потерь от индукции при фиксированных частотах  $p = F(B_m)$ .

По полученным данным должны быть построены зависимости удельных потерь и проницаемости от частоты при фиксированных индукциях, а также графики зависимости магнитных характеристик от толщины ленты сплава при фиксированных условиях испытания.

При синусоидальной кривой напряженности поля и фиксированных частотах:

1. Кривые намагничивания  $B_m = F(H_m)$ .

2. Зависимость магнитной проницаемости от амплитуды напряженности поля

$$\mu_{-} = \frac{B_m}{H_m} = F(H_m).$$

Эти характеристики могут быть получены и с подмагничиванием.

3. Кривые намагничивания  $B_H = F(H_m)$ , где  $B_H$  — составляющая индукции, находящаяся в фазе с напряженностью поля.

4. Зависимость магнитной проницаемости, определяемой по составляющей индукции, которая находится в фазе с напряженностью поля, от амплитуды последней

$$\mu_H = \frac{B_H}{H_m} = F(H_m).$$

5. Семейство динамических петель при фиксированных максимальных напряженностях поля (с указанием суммарных потерь).

6. Кривые зависимости удельных потерь от напряженности поля при фиксированных частотах  $p = F(H_m)$ .

По полученным данным должны быть построены зависимости удельных потерь и проницаемости от частоты при фиксированных напряженностях поля, а также графики зависимости магнитных характеристик от толщины ленты сплава.

Для сплавов с постоянной проницаемостью, кроме указанных выше ее зависимостей от  $H$ ,  $B$  и  $f$ , необходимы следующие данные:

1. Зависимость обратимой проницаемости от частоты при различных напряженностях поля  $\mu_{\Delta} = F(f)$ .

2. Коэффициент магнитной неустойчивости в зависимости от  $H_m$

$$K_{nc} = \frac{\mu_{1,6} - \mu_{1,0}}{\mu_{1,0}} = F(H_m),$$

где  $\mu_{1,6}$  — относительная магнитная проницаемость при  $H = 1,6$  а/м.

3. Коэффициенты потерь на гистерезис  $q_r$ , вихревые токи  $q_v$  и дополнительных потерь  $q_d$ .

4. Кривые зависимости проницаемости  $\mu_{\sim} = F(H_{\sim})$  при  $H_{\sim} = \text{const}$  и  $\mu_{\sim} = F(H_{\sim})$  при  $H_{\sim} = \text{const}$ , где  $H_{\sim}$  и  $H_{\sim}$  — напряженности постоянного и переменного полей.

Для магнитоэластичных сплавов в динамическом режиме при частотах 20—100 кгц необходимо определять:

а) зависимость индукции от напряженности поля  $B = F(H)$ ;

б) зависимость удельных потерь от индукции  $\rho = F(B)$ .

Эти зависимости определяют при различных напряженностях подмагничивающего поля;

в) коэффициент динамической магнитоэластичности  $\lambda_{дин}$  в зависимости от напряженности подмагничивающего поля и соответствующей ей индукции

$$\lambda_{дин} = \frac{\partial \sigma}{\partial B},$$

где  $\partial \sigma$  — изменение механического напряжения, которое возникает в образце с заданной величиной магнитоэластичности при изменении индукции  $B$  и постоянном поляризующем поле;

г) коэффициент электромеханической связи, характеризующий отношение магнитной энергии, превращенной в энергию упругих колебаний, к общей магнитной энергии.

В динамическом режиме намагничивания, как и в статическом, представляют интерес свойства сплавов при различных температурах. Здесь также могут быть рекомендованы интервалы от  $-60$  до  $+100^\circ \text{C}$  (с определением свойств при  $-60, 0, +20, +60$  и  $+100^\circ \text{C}$ ) и от  $-196^\circ \text{C}$  до температуры точки Кюри.

Выбор частот для испытаний магнитномягких сплавов в динамическом режиме производят согласно стандартам, а также по данным отечественной и зарубежной литературы.

Для установок переменного тока в ГОСТ 6697—63 указан ряд номинальных частот, а именно: 10, 25, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2400, 4800, 8000, 9600 гц. Однако аппаратура, в которой применяют сердечники, чаще всего работает при 50, 100, 400, 500, 800, 1000, 1200, 1600, 2400, 4800 и 9600 гц, поэтому при испытании целесообразно ограничиться этими частотами. В случае необходимости использования более высоких частот рекомендуем: 20, 40, 80, 100, 200 и 300 кгц.

Для сплавов 1—7-й групп, а также для электротехнической стали при толщине проката 0,35—0,2 мм верхний предел частоты может быть ограничен 20 кгц (для сплавов с постоянной проницаемостью 200 кгц).

При частотах до 10 кгц индукцию, до которой производят намагничивание, можно ограничить 80—90% от индукции насыщения. Для сплавов, толщина проката которых 0,1, 0,08 и 0,05 мм, диапазон частот должен быть расширен до 20—100 кгц (при соответствующем понижении максимального значения индукции), а для лент толщиной 0,02 и менее — до 300 кгц.

Определение магнитных свойств при толщине лент менее 0,003 мм при динамическом режиме нецелесообразно, так как сердечники из таких тонких лент обычно намагничиваются в импульсном режиме. Для установления характеристик сплавов при намагничивании в импульсном режиме требуется специальная разработка методики.



**О ВЫБОРЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРО-  
ТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННЫХ  
СТАНДАРТОВ, ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ  
И В КАЧЕСТВЕ СПРАВОЧНЫХ**

Сталь электротехническая низкоуглеродистая сортовая и листовая служит основным материалом для изготовления реле постоянного тока. Главной ее характеристикой для стандартов является коэрцитивная сила  $H_c$ , от которой зависит остаточная индукция в магнитной цепи с зазором; остаточная индукция влияет на надежность работы реле.

Широкое применение находит эта сталь и в изготовлении магнитопроводов постоянного тока, для расчета которых необходимо знать несколько точек кривой намагничивания в постоянном поле. Поэтому целесообразно включить в государственные стандарты значения индукции в магнитных полях напряженностью 5, 25, 100 *а/см* (*B5, B25, B100*).

Учитывая большую склонность стали к старению, что приводит к нарушению работы реле, следует нормировать в стандартах коэффициент старения, понимая под ним относительное увеличение  $H_c$  после выдержки образца в течение 100 ч при 100° С. В качестве справочных характеристик следует привести значения кривой намагничивания в постоянном поле, начиная со слабых полей напряженностью от 10 *а/м* до 40 *ка/м*, а также семейство симметричных гистерезисных петель при максимальных индукциях 0,1—2,0 *тл*.

Сталь электротехническая тонколистовая и рудонная применяется чаще всего в условиях перемагничивания переменным полем. Ее электромагнитные свойства оцениваются в стандартах по двум характеристикам: удельным потерям при синусоидальной индукции и индукциям при заданных напряженностях постоянного поля.

При оценке целесообразности введения в государственные стандарты тех или иных характеристик необходимо руководствоваться, во-первых, тем, насколько они отражают поведение металла в реальных, наиболее распространенных условиях применения, и, во-вторых, насколько удобно в практическом отношении их измерение. С этих точек зрения определение удельных потерь при синусоидальной индукции, по-видимому, не вызывает возражений, так как близко к таким условиям работают и силовые трансформаторы, и электрические машины — основные потребители стали; достаточно полно изучена и методика измерений. Иное положение с оценкой способности стали к намагничиванию.

До сих пор в отечественных и зарубежных стандартах нормируют несколько точек основной кривой намагничивания. Эту характеристику определяют при постоянном токе от специального источника питания изме-

рительной аппаратурой, отличающейся от применяемой при определении удельных потерь  $p$ . Естественно, возникает вопрос: не целесообразно ли перейти к измерениям в переменном поле. Можно утверждать, что зависимость максимального значения индукции  $B_m$  от действующего  $H$  или максимального  $H_m$  значения напряженности поля более точно характеризует

Таблица 1

Сталь	Характеристики	
	сдаточные	справочные
Горячекатаная и холоднокатаная малотекстурованная, в сильных полях	$H_m = F(B_m)$ при $B_m = 1,0; 1,2; 1,4; 1,5; 1,6$ тл $p$ 1,0/50 и $p$ 1,5/50	$B = F(H)$ в постоянном поле при $H = 1 \div 30$ кА/м $H = F(B_m)$ или $H_m = F(B_m)$ при $f = 50$ Гц и $B_m = 1,0 \div 1,6$ тл $p = F(B_m)$ при $B_m = 1,0 \div 1,8$ тл
Холоднокатаная текстурованная, в сильных полях	$H_m = F(B_m)$ при $B_m = 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8$ тл $p$ 1,5/50 и $p$ 1,7/50	$B = F(H)$ в постоянном поле при $H = 0,1 \div 30$ кА/м $H = F(B_m)$ или $H_m = F(B_m)$ при $f = 500$ Гц и $B_m = 1,4 \div 1,8$ тл $p = F(B_m)$ при $B_m = 1,0 \div 2,0$ тл и различных углах к направлению проката $H_m = F(B_m)$ при различных углах к направлению проката
Горячекатаная и холоднокатаная текстурованная, в средних полях (трансформаторы тока и пр.)	$H_m = F(B_m)$ при синусоидальном значении $H_m$ . Значение $B_m$ принять в соответствии с существующими ГОСТ и ТУ	$H = F(B_m)$ или $H_m = F(B_m)$ при $B_m = 0,01 \div 1,5$ тл Кривые одновременного намагничивания постоянным и переменным полями

Таблица 2

Сталь	Толщина проката $d$ , мм	Характеристики	
		сдаточные	справочные
Нетекстурованная	0,35; 0,20; 1,0	$H_m = F(B_m)$ при $f = 400$ Гц и $B_m = 0,75; 1,0; 1,25$ тл $p$ 0,75/400 и $p$ 1,0/400	$H = F(B)$
Текстурованная	0,20; 0,15	$H_m = F(B_m)$ при $f = 400$ Гц и $B_m = 1,0; 1,25; 1,5$ тл $p$ 1,0/400 и $p$ 1,5/400	$\mu_{вч} = F(f)$ при различных значениях $d$
Текстурованная	0,10; 0,08	$H_m = F(B_m)$ при $f = 400$ Гц и $B_m = 1,0; 1,25; 1,5$ тл $p$ 1,5/400, $p$ 0,5/800 и $p$ 0,75/800	$p = F(B_m, f, d)$
Текстурованная	0,05	$H_m = F(B_m)$ при $f = 2400$ Гц и $B_m = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ тл $p$ 0,25/2400 и $p$ 0,5/2400	Типовые кривые одновременного намагничивания переменным и постоянным полями

поведение стали в отношении намагничивания в переменном поле, чем основная кривая намагничивания. С точки зрения удобства и простоты также предпочтительнее измерять характеристики в переменном поле. На основании этих соображений в новые стандарты ГДР DIN 50461 (1960 г.) и 50462 (1961 г.) введены значения кривой намагничивания  $H_m = F(B_m)$ .

В табл. 1 приведены предлагаемые сдаточные и справочные характеристики для сталей, применяемых в переменных магнитных полях частоты  $f$ .

При измерении в сильных полях повышенной частоты основной характеристикой являются удельные потери, которые зависят от толщины проката стали, максимальной индукции и частоты. В качестве примера варианта для стандартов и справочных данных можно предложить табл. 2.

Таблица 3

Сталь	Толщина проката $\delta$ , мм	Частота тока $f$ , гц
Нетекстурованная, в слабых полях	0,35; 0,20	400, 800
То же, в средних полях	0,35; 0,20	50, 400
Текстурованная, в средних полях	0,50; 0,35	50
» » » »	0,20; 0,10	400, 800, 1600
» » » »	0,08; 0,05	1600, 2400

При измерении в слабых и средних полях повышенной частоты основной характеристикой является кривая намагничивания, которую удобнее определять при синусоидальной напряженности поля. Значения  $H_m$  следует установить дополнительно. Частота измерений должна быть выбрана в соответствии с толщиной проката стали по табл. 3.

**ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ  
ОЦЕНКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ  
ПОЛЯХ ЧАСТОТОЙ ДО 10 кГц**

Основными характеристиками магнитных материалов, определяемыми электроизмерительными приборами непосредственной оценки, являются:

1. Основная динамическая кривая намагничивания как зависимость максимального значения индукции от максимального значения напряженности поля  $B_{\max} = F(H_{\max})$ . Эту зависимость определяют в двух граничных режимах намагничивания — при практически синусоидальной кривой индукции и синусоидальной кривой напряженности поля\* [1, 2]. Аппаратура должна допускать также измерения и в режимах, когда обе кривые искажены.

По  $B_{\max}$  и  $H_{\max}$  рассчитывают кривую амплитудной магнитной проницаемости  $\mu_a = F(H_{\max})$  или  $\mu_a = F(B_{\max})$ , где  $\mu_a = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$ . Последняя кривая в отдельных случаях может быть получена непосредственными измерениями  $\mu_a$  и  $H_{\max}$  или  $B_{\max}$ .

2. Семейство зависимостей полусуммы амплитуд переменной составляющей индукции от полусуммы амплитуд переменной составляющей напряженности поля при одновременном намагничивании материала переменным и постоянным полями

$$\frac{B_{\max} + B_{\min}}{2} = F\left(\frac{H_{\max} + H_{\min}}{2}\right).$$

В частных случаях при синусоидальном характере кривых напряженности магнитного поля или индукции эти кривые будут представлены соответственно в виде зависимостей:

$$\frac{B_{\max} + B_{\min}}{2} = F(H_{\max});$$

$$B_{\max} = F\left(\frac{H_{\max} + H_{\min}}{2}\right).$$

\* В дальнейшем такие кривые названы просто синусоидальными.

По циклическим изменениям индукции  $\Delta B$  и напряженности поля  $\Delta H$  могут быть определены средняя магнитная проницаемость

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}}$$

и ее зависимости от напряженности постоянного поля  $H_{\perp}$ , амплитудного значения индукции  $B_{\max}$  или напряженности поля  $H_{\max}$ .

3. Кривые зависимости циклического изменения магнитной индукции от напряженности постоянного поля при одновременном намагничивании образца постоянным и выпрямленным переменным полями  $\Delta B = F(H_{\perp})$ .

4. Основная динамическая кривая намагничивания как зависимость амплитудного значения индукции при синусоидальном характере ее изменения от действующего значения напряженности намагничивающего поля  $B_{\max} = F(H)$ .

По  $B_{\max}$  и  $H$  иногда определяют проницаемость:

$$\mu = \frac{B_{\max}}{H}$$

5. Кривая зависимости действующего значения э. д. с.  $E_2$ , индуцированной в измерительной (вторичной) обмотке образца, от амплитудного значения напряженности магнитного поля  $E_2 = F(H_{\max})$ . Эта кривая описывает поведение магнитных материалов в динамическом режиме при синусоидальном характере напряженности поля.

На основании результатов измерений  $E_2$  и  $H_{\max}$  иногда рассчитывают условную проницаемость по формуле [3]

$$\mu = \frac{1}{\pi \sqrt{2} f S \omega_2} \cdot \frac{E_2}{H_{\max}}$$

где  $S$  — площадь поперечного сечения образца;

$\omega_2$  — число витков измерительной (вторичной) обмотки.

В отдельных случаях характеристики, указанные в пп. 4 и 5, определяют в условиях одновременного намагничивания постоянным и переменным полями, при этом получают семейство характеристик  $\mu = F(H_{\max})$  или  $\mu = F(B_{\max})$  при различных фиксированных  $H_{\perp}$ .

6. Основная динамическая кривая намагничивания как зависимость амплитудного значения магнитной индукции от соответствующего ему мгновенного значения напряженности поля  $B_{\max} = F(H_{B_{\max}})$ . Характеристики такого вида встречаются редко и могут быть измерены как в режиме синусоидальной индукции, так и в режиме синусоидальной напряженности поля [4].

7. Динамическая магнитная петля (петля гистерезиса), определяемая по точкам,  $B_i = F(H_i)$ , где  $B_i$  и  $H_i$  — соответственно мгновенные значения индукции и напряженности магнитного поля.

8. Суммарные удельные потери на гистерезис, вихревые токи и дополнительные потери  $p = F(B_{\max})$ . Обычно эту характеристику измеряют в режиме синусоидальной магнитной индукции и только при испытании материалов для гистерезисных двигателей — в режиме синусоидальной напряженности магнитного поля.

9. Основная динамическая кривая намагничивания, определяемая по первым гармоникам напряженности магнитного поля и магнитной индукции  $B_{1\max} = F(H_{1\max})$ , и зависимость удельных потерь от амплитуды первой гармоники магнитной индукции  $p = F(B_{1\max})$ . Эти характеристики измеряют преимущественно не приборами непосредственной оценки, а иной аппаратурой, которая в данной статье не рассматривается.




### Приборы для получения динамических кривых намагничивания

На рис. 1—5 приведены схемы для определения перечисленных выше видов характеристик. При испытании образцов в условиях одновременного действия постоянного и переменного полей включают обмотку постоянного тока, как показано пунктиром на рис. 1, а.

В табл. 1 перечислены приборы, рекомендуемые в случае применения схем, представленных на рис. 1, а—в, для измерений в режимах синусоидальной напряженности поля и индукции. Кроме изображенных на этих схемах приборов, кривые зависимости  $B_{\max} = F(H_{\max})$  определяют фазочувствительными вольтметрами, а лучше всего феррометрами с фазочувствительными вольтметрами, например У-542, Ф-2 и др. [5, 6].

Таблица 1

Характеристики	Рекомендуемые меры и измерительные приборы (и рис. 1, а, б, в)	
	режим синусоидальной напряженности поля	режим синусоидальной индукции
$B_{\max} = F(H_{\max})$ $\mu_a = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$ $\mu_{\Delta} = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}}$ $\mu_{\Delta} = F(H_{\Delta})$ $\mu_{\Delta} = F(B_{\max})$ $\mu_{\Delta} = F(H_{\max})$	$r_N$ — измерительное сопротивление $r_N \geq 0,1 \text{ ом}$ $V_a$ — амплитудный (милли)вольтметр или любой (милли)вольтметр с малым потреблением $V_{\text{ср}}$ — (милли) вольтметр средних значений	$r_N < 1 \text{ ом}$ или любой (милли) вольтметр с малым потреблением $V_{\text{ср}}$ — (милли) вольтметр средних значений или любой (милли) вольтметр с малым потреблением
	$\omega_1$ — намагничивающая обмотка $\omega_2$ — измерительная обмотка $M$ — катушка взаимной индуктивности $0,01 \text{ мГн} < M < 10 \text{ мГн}$	$M < 0,1 \text{ мГн}$ $V'_{\text{ср}}$ — (милли) вольтметр средних значений или любой вольтметр с малым потреблением $V''_{\text{ср}}$ — (милли) вольтметр средних значений или любой (милли) вольтметр с малым потреблением
	 $K_H$ — плоская измерительная катушка	

Рассмотренные на рис. 1—5 схемы позволяют получать соответствующие виды характеристик на кольцевых, тороидальных и полосовых (в приборе Эшштейна) образцах, а в ряде случаев и на целых листах электротехнической стали. При испытании кольцевых, тороидальных и полосовых образцов, когда напряженность поля рассчитывают по намагничивающему току синусоидального характера, в схемах на рис. 1, а, б и рис. 4 ток можно измерять любыми (милли)амперметрами переменного тока требуемого класса точности.

Поскольку на практике пользуются почти всеми видами перечисленных выше характеристик, то следует предусмотреть такую измерительную аппаратуру, которая позволяла бы определять все эти характеристики.

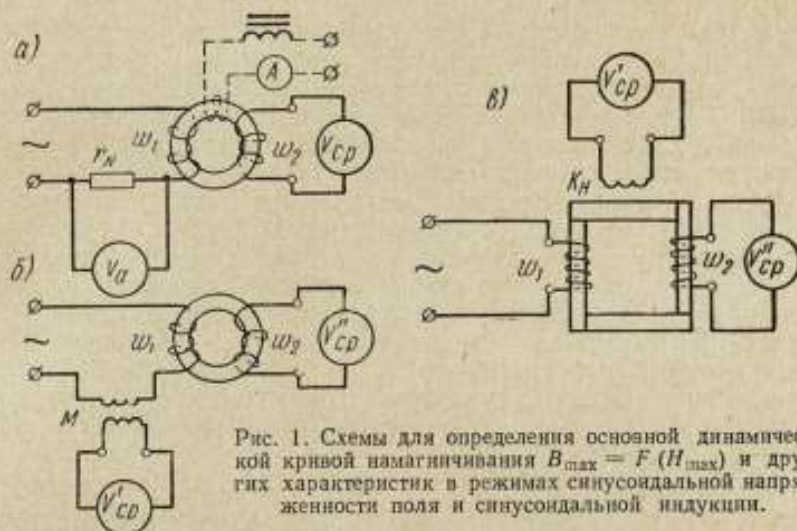


Рис. 1. Схемы для определения основной динамической кривой намагничивания  $B_{\max} = F(H_{\max})$  и других характеристик в режимах синусоидальной напряженности поля и синусоидальной индукции.

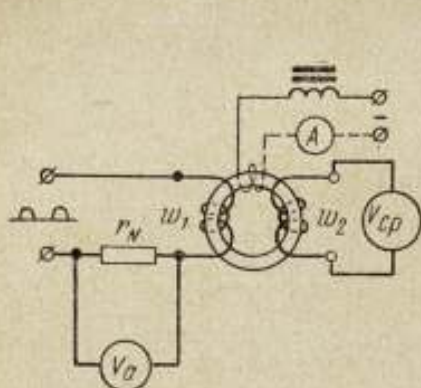


Рис. 2. Схема для определения зависимости  $\Delta B = F(H_{\max})$  в случае одновременного намагничивания постоянным и выпрямленным переменным полями.

$V_d$  и  $V_{cp}$  — (милли) вольтметры амплитудных и средних значений.

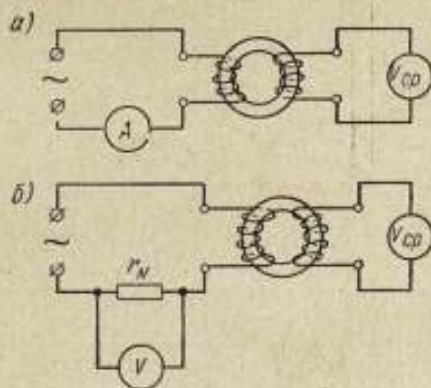


Рис. 3. Схемы для определения основной динамической кривой намагничивания  $B_{\max} = F(H)$  в режиме синусоидальной индукции.

$V_{cp}$  — (милли) вольтметры средних значений или любые с малым потреблением;  $V$  — (милли) вольтметр для измерения действующих значений искаженных напряжений;  $A$  — (милли) амперметр действующих значений.

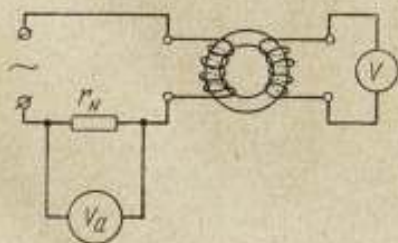


Рис. 4. Схема для определения зависимости  $E_2 = F(H_{\max})$  в режиме синусоидальной напряженности поля.

$V$  — (милли) вольтметр для измерения действующих значений искаженных напряжений;  $V_d$  — (милли) вольтметр амплитудных значений или любой с малым потреблением.

Рассмотрев схемы рис. 1—5, можно заключить, что основными измерительными приборами являются: вольтметры и милливольтметры, измеряющие средние значения\* сильно искаженных напряжений с коэффициентом формы до 2,5—3,0; амплитудные вольтметры и милливольтметры, измеряющие амплитудные значения искаженных напряжений; амперметры и миллиамперметры, измеряющие действующие значения сильно искаженных токов. При определении действующих значений тока должно быть соблюдено требование малого сопротивления прибора, чтобы при его включении практически не изменялись параметры намагничивающей цепи. Поэтому часто в таких случаях миллиамперметры заменяют милливольтметрами и измеряют ими падение напряжения на малом активном сопротивлении  $r_N$ . Если материалы испытывают при синусоидальном намагничивающем токе или синусоидальной э. д. с. в измерительной обмотке, то для определения этих величин могут быть использованы вольтметры или

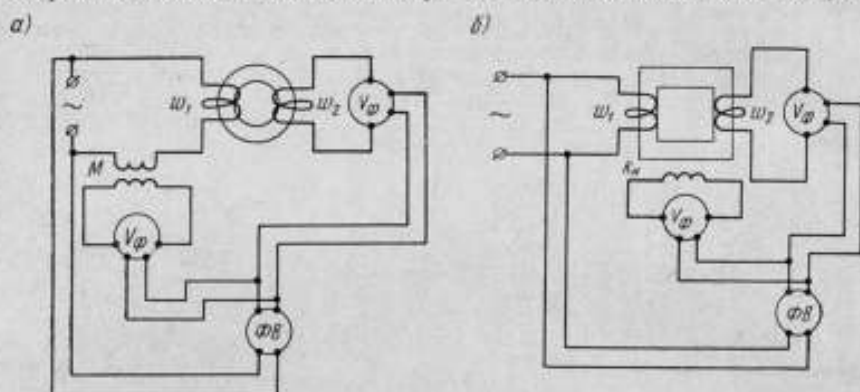


Рис. 5. Схемы для определения динамической магнитной петли  $B_1 = F(H_1)$ .

$V_\phi$  — вольтметры средних значений с фазочувствительными выпрямителями;  $\Phi B$  — фазо-вращатели, изменяющие фазу управляющего напряжения в пределах  $360^\circ$ .

амперметры любой системы. К вольтметрам предъявляют требование малого собственного потребления. В качестве мер в данных схемах используют измерительные активные сопротивления и катушки взаимной индуктивности.

Приведенные на рис. 1—5 простейшие схемы широко применяют в практике [1, 5—7]. Большая часть из этих схем положена в основу комплексных установок УМИПТ-1, УМИПТ-2, У-5011, У-5018 и других, выпускаемых отечественными предприятиями.

В каталогах зарубежных фирм отсутствуют сведения об установках для магнитных измерений, работающих по принципу амперметра и вольтметра или двух вольтметров. В то же время в научно-исследовательских работах и при контрольных испытаниях такие схемы находят широкое распространение [8, 9]. Некоторые зарубежные фирмы изготавливают приборы, определяющие сильно искаженные токи и напряжения и пригодные поэтому для магнитных измерений. Так, например, датская фирма «Брюль и Кьер» выпускает ламповый вольтметр типа 2409 для измерения действующих, средних и амплитудных значений напряжений в пределах  $10 \text{ мВ}—1000 \text{ В}$  в диапазоне частот  $2 \text{ Гц}—200 \text{ кГц}$ . Этим прибором располагают и многие отечественные предприятия. Широко известен также феррометр типа Ms.1a.3b фирмы «Сименс» (ФРГ), предназначенный для испытания магнитных материалов на частоте  $50 \text{ Гц}$ . В основу работы феррометра положен принцип действия вольтметра с управляемым механическим выпрямителем.

\* В дальнейшем такие приборы названы приборами средних значений.



В табл. 2 указаны разновидности выпускаемых в СССР приборов, которые могут быть использованы при испытании магнитных материалов. Кроме перечисленных в таблице приборов, часть из которых входит в комплекты магнитоизмерительной аппаратуры, для этих целей могут быть использованы и другие аналогичные приборы различных систем, поверенные в условиях измерений весьма искаженных кривых напряжений и токов.

Рассмотрев ряд электронизмерительных приборов непосредственной оценки, применяемых для определения динамических кривых намагничивания, можно отметить следующее.

Во всех случаях магнитных измерений электронным приборам отдается предпочтение, потому что они имеют малое собственное потребление и, следовательно, их параметры мало влияют на магнитное состояние испытуемых образцов. Наиболее целесообразно применение электронных вольтметров средних, амплитудных и действующих значений и миллиамперметров, измеряющих сильно искаженные напряжения и токи с коэффициентом формы порядка 2,5—3,0.

Существенный интерес представляют недавно разработанные электронные приборы Ф-58, Ф-505 и Ф-506 достаточно высокого класса точности. Однако они еще не исследованы во ВНИИМ с точки зрения их применения в условиях больших насыщений магнитных материалов при сильно искаженных кривых напряжений и токов.

Чувствительность выпускаемых в СССР электронных милливольтметров достаточна для испытания большей части магнитных материалов. Необходимо повысить класс точности (до 1,5) импульсных вольтметров. Для вольтметров средних значений перспективными являются схемы с фазочувствительными (в пределах  $360^\circ$ ) полупроводниковыми и ламповыми выпрямителями, которые позволяют снизить влияние высокочастотных помех и дают возможность определять динамические петли гистерезиса.

Еще редко магнитные измерения производят такими приборами, как логометры, хотя и известно их использование в качестве  $\mu$ -метров. В 1958—1959 гг.  $\mu$ -метр был разработан в Институте электротехники АН УССР [10]. В 1961 г. на конференции ИМЕКО, в Будапеште, докладывалось о применении логометра для измерения магнитной проницаемости [11]. Однако промышленность до сих пор не выпускает измерителей магнитной проницаемости, несмотря на то, что в ряде случаев они могли бы заменить сложные комплексные установки.

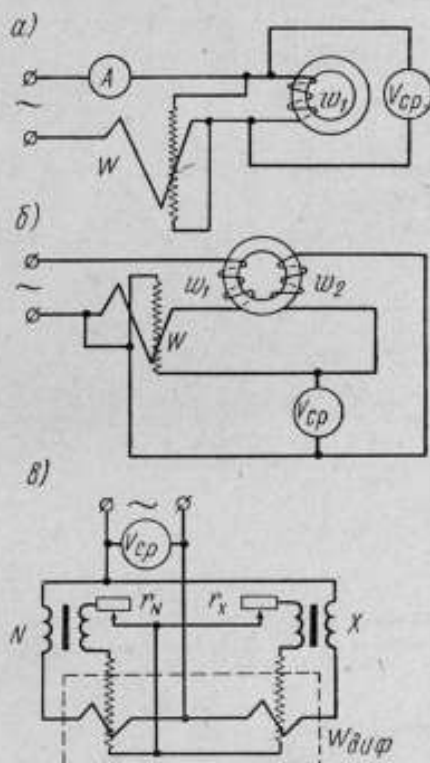


Рис. 6. Схемы для определения суммарных удельных потерь  $p = F(B_{max})$  на перемагничивание образца.

$W$  — малокоэффициентные ваттметры;  $W_{diff}$  — дифференциальный ваттметр;  $V_{cp}$  — вольтметры средних значений или любые с малым потреблением (в режиме синусоидальной индукции);  $r_N$  и  $r_X$  — магнитные сопротивления;  $N$  и  $X$  — нормальный и испытуемый образцы.

Таблица 2

Приборы	Класс точности или основная погрешность, %	Пределы измерений	Диапазон частот, $\text{гц}$
Вольтметр средних значений Ц-58	1,0	15—300 $\text{в}$	500—10 000
То же, Ф-517	1,5	0,01—0,03—0,1—0,3— 1—3—10—30—100—300 $\text{в}$	200—9600
Милливольтметр средних значений ВЗ-28	2,5	1—2—5—10—20—50— 100—200—500 $\text{мв}$ 1—2—5—10—20—50— 100—200 $\text{в}$	40—25 000
Импульсный милливольтметр В4-3	4—6	0,01—3 $\text{в}$ ; при использовании делителя напряжения—до 300 $\text{в}$	50—20 000
Вольтметр Ц-50	1,5	0,15—300 $\text{в}$	50
Феррометр У-542 с фазочувствительным вольтметром	2,5	0,003—0,01—0,03— 0,1—0,3—1—3 $\text{в}$	50
То же, Ф-2	1,5	3—7,5—15—30 $\text{в}$	50—10 000
» Ф-3	2,5	0,25—0,5—1—2,5— 5—10—25—50 $\text{в}$	200—10 000
Амплитудный (мили) вольтметр компенсационного типа	2,5	0,03—0,1—0,3—1—3— 10—30—100—300 $\text{в}$	30—10 000
Вольтметр действующих значений ВЗ-19	3	0,01—0,03—0,1—0,3— 1—3—10—30—100—300 $\text{в}$	200—10 000
То же, ВЗ-20	6	0,01—0,03—0,1—0,3— 1—3—10—30—100—300 $\text{в}$	50—60 000
То же, с термопреобразователем (входит в комплект установки УМИПТ-1)	1,5—2,5	7,5 $\text{мв}$ —300 $\text{в}$	45—300 000
Вольтметр электронный Ф-505	2,5	5—25—100—250 $\text{в}$	50—2500
Миллиамперметры электронные Ф-58 и Ф-58-Г	1,5	0,1—20 $\text{ма}$ 2—500 $\text{ма}$	45—10 000
Вольтмиллиамперметр электронный Ф-506	1,0	10 $\text{мкв}$ —300 $\text{ма}$ 10 $\text{мв}$ —300 $\text{в}$	20—20 000

### Приборы для определения потерь

Потери в образцах из ферромагнитных материалов обычно измеряют в режиме синусоидального изменения магнитной индукции и чаще всего малокосинусными ваттметрами. В отдельных случаях (при частоте 50  $\text{гц}$ ) используют феррометр У-542 [5], однако этот прибор не обеспечивает удовлетворительной точности измерения.

Потери определяют в кольцевых и полосовых (в приборах Эпштейна) образцах, а также в целых листах и рулонной ленте (в специальных намагничивающих устройствах). Приборами Эпштейна измеряют в основном потери в листовой электротехнической стали в диапазоне частот 50—1000  $\text{гц}$ . В СССР изготавливают эти приборы в соответствии с ГОСТ 802—58 для образцов длиной 250 и 500  $\text{мм}$ . Образцы из высокопроницаемых сплавов обычно имеют форму колец.

На рис. 6, а, б приведены основные схемы для измерения суммарных удельных потерь ваттметрами. Наряду с этими схемами в практике получили распространение двоянные приборы Эпштейна (рис. 6, в) с дифференциальными ваттметрами. Схема рис. 6, б встречается в ряде отечественных установок типа У-5010, У-578, У-5018 и УМИПТ-2, где применяются в ос-

Таблица 3

Ваттметры	Класс точности или основная погрешность, %	Пределы измерений	Диапазон частот, гц
Д-522	1,0	0,25—0,5—1—2,5—5—10 а 75—150—300—600 в $\cos \varphi=0,1$	45—55
Д-542	0,5	2,5—5 а 30—75—150—300 в $\cos \varphi=0,1$	45—400
Д-557 (входит в комплект установки У-5011)	1,0	0,5 а; 15—30—75—150—300 в $\cos \varphi=0,1$	25—1000
ВМТ-2 (входит в комплект установки УМИПТ-2)	1,5	0,1—0,25—0,5—1—2,5—5—10 а 10—20—50—100—200 в $\cos \varphi=0,2$	50—10 000
Ф-518/1 (входит в комплект установки У-5018)	4,0	0,5—1—2,5—5—10—25 а 0,01—0,03—0,1—0,3—1—3— 10—30—100—300 в $\cos \varphi=0,1$	200—9600
Ф-530	2,5	0,1—500 мв; 20 мв—300 в $\cos \varphi=0,1 \div 1$	20—20 000
Д-543	4,0	Чувствительность 40 дел/вт $\cos \varphi=0,1$	45—55

новном электродинамические, термоэлектрические и электронные ваттметры [1].

В табл. 3 указаны основные типы малокоcosинусных ваттметров, выпускаемых в СССР. Поскольку ваттметр Ф-518/1 входит в комплект установки У-5018, а Ф-530 предназначен для определения малых потерь и имеет ограниченный диапазон измерений по току, в настоящее время малокоcosинусные ваттметры для испытаний в звуковом диапазоне частот образцов из пермаллоя и электротехнической стали при толщине проката 0,1—0,5 мм фактически отсутствуют. Ваттметр ВМТ-2, рассчитанный на звуковые частоты, изготовлен в ограниченном количестве и ввиду значительного потребления цепи напряжения непригоден для исследования образцов со сравнительно небольшими потерями.

### Выводы и предложения

Рассмотрев электроизмерительные приборы непосредственной оценки, выпускаемые отечественной промышленностью для измерения характеристик магнитных материалов, можно сделать следующие выводы:

1. В последние годы промышленностью СССР разработаны и выпускаются приборы различных типов, которые могут быть рекомендованы к выпуску и в дальнейшем, — вольтметры средних значений Ц-58, Ф-517, ВЗ-28, действующих значений ВЗ-19, ВЗ-20 и фазочувствительные Ц-50, Ф-2, Ф-3, а также ваттметры Д-542, Д-557, Ф-518/1 и др.

2. В большинстве случаев чувствительность приборов Ф-517, Ф-518, ВЗ-19 и ВЗ-20 последних выпусков достаточна для испытания основных видов ферромагнитных материалов, точность же приборов высокой чувствительности мала.

3. До сих пор промышленность не выпускает вольтметры средних значений и ваттметры для исследования магнитных материалов в условиях,

близких к насыщению, при частоте выше 20 кГц, в то время как потребность в них остро ощущается.

В целях дальнейшего развития магнитоизмерительной аппаратуры, использующей приборы непосредственной оценки, можно предложить:

1. Организовать выпуск в большем количестве и более широкой номенклатуры вольтметров и милливольтметров средних значений, а также малокосинусных ваттметров с малым потреблением в цепи напряжения, ограничив при этом выпуск сложных комплексных установок для магнитных измерений.

2. Повысить классы точности вольтметров средних, действующих и амплитудных значений до 0,5, милливольтметров до 1,5, ваттметров до 0,5 и милливаттметров до 1,5.

3. Разработать ваттметр, аналогичный Ф-518/1, но класса точности 2,5 и выше, с нижним значением диапазона частот  $\leq 50$  гц.

4. Расширить пределы измерений вольтметров и ваттметров в сторону высоких частот, хотя бы до 200 кГц.

5. Создать малокосинусные ваттметры, предназначенные для работы в цепях с низким  $\cos \varphi$ , порядка 0,05—0,02.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев Е. Т., Чернышева Н. Г., Чечурина Е. Н. Магнитные измерения на постоянном и переменном токе. М., Стандартгиз, 1962.
2. Чернышев Е. Т. Магнитные измерения и характеристики магнитных материалов. Энциклопедия измерений, контроля и автоматки, вып. 1. Л., ГЭИ, 1962.
3. Розенблат М. А. Магнитные усилители, т. 1. М., «Советское радио», 1960.
4. Векслер А. З., Пензков Н. В. Исследование аппарата для определения кривой намагничивания электротехнической стали в слабых полях. «Труды институтов Комитета», вып. 72 (132). М.—Л., Стандартгиз, 1963.
5. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М., ГЭИ, 1963.
6. Чернышев Е. Т., Чечурина Е. Н., Чернышева Н. Г., Орлова И. А. Работы ВНИИМ в области создания методики и аппаратуры для испытания нормальных образцов ферромагнитных материалов на переменном токе. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
7. Горюштин Г. Л. Феррометр для повышенных частот. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
8. Jaquet J. R. Design criteria for a practical flux reset core tester. Conference on magnetic amplifiers. AIEE, 1956.
9. Alternating current core loss and permeability of magnetic materials. ASTM. Designation A343—54, 1955.
10. Петрученко В. Ф. Измеритель магнитной проницаемости ( $\mu$ -метр) с непосредственным отсчетом. «Автоматика», 1957, № 1.
11. Baltadjiev A. Sur quelques nouveaux instruments pour mesurer la permeabilite. ACTA IMEKO, 25—BU—164, 1961.

## ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ И ЗАПИСИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ КРИВЫХ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНОМЯГКИХ И МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Измерительные устройства для наблюдения и записи кривых намагничивания по принципу действия можно подразделить на четыре группы:

- I. Феррометры с координатными самописцами на выходе.
- II. Феррографы с записью кривых на электронно-лучевой трубке.
- III. Самописцы с фотоэлектрическими усилителями.
- IV. Стробоскопические устройства.

### Принцип действия аппаратуры

I. Принцип действия феррометра основан на пропорциональности мгновенного значения несинусоидальной периодической функции среднему значению ее производной [1]. Измеряя магнитоэлектрическими приборами с управляемыми выпрямителями средние значения  $\frac{dB(t)}{dt}$  и  $\frac{dH(t)}{dt}$  (или  $\frac{di}{dt}$ , где  $i$  — намагничивающий ток) периодических функций индукции  $B(t)$  и напряженности магнитного поля  $H(t)$  и пользуясь указанной выше связью, можно рассчитать мгновенные значения  $H(t)$  и  $B(t)$ . Дифференцирование функции  $B(t)$  осуществляется самим образцом, функции  $H(t)$  — катушкой взаимной индуктивности или измерительной катушкой (в частности, потенциалометром), помещенной на поверхности образца. Изменяя фазовращателем начало отсечки управляемого выпрямителя, можно получить мгновенные значения  $B_t$  и  $H_t$  за полный период.

Запись динамической петли (цикла) производит гальванометрический осциллограф, состоящий из двух магнитоэлектрических гальванометров, оси вращения подвижных частей которых расположены под прямым углом друг к другу, как схематически показано на рис. 1.

Свет от точечного источника 1 падает на зеркальце 2 первого гальванометра; отражаясь, он попадает на зеркальце 3 второго гальванометра, отразившись от которого, дает световую точку на экране 4. На вход одного из гальванометров через управляемый выпрямитель подается напряжение, пропорциональное производной индукции в образце, а на вход второго,

пропорциональное напряженности магнитного поля. Поскольку магнитоэлектрические гальванометры являются приборами для измерения средних значений напряжения, то отклонения их подвижных частей пропорциональны соответственно  $B_t$  и  $H_t$ ; при полном повороте фазовращателя (на  $360^\circ$ ) на экране координатного самописца видна динамическая петля, которая может быть зарисована на кальке или сфотографирована.

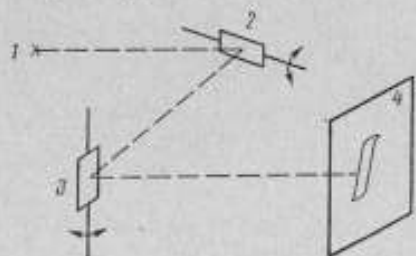


Рис. 1. Схема действия гальванометрического осциллографа.

назначены для измерения, с записью на экране электронно-лучевой трубки, динамических петель перемагничивания (в том числе частных циклов), временных кривых индукции и напряженности магнитного поля, кривых зависимости дифференциальной проницаемости от напряженности магнитного поля и т. п. Принцип работы феррографа виден из рис. 2.

Э. д. с. измерительной обмотки  $w_2$  образца поступает на интегратор  $I$ , напряжение с выхода которого, пропорциональное индукции в образце, по-

дается на вертикальный вход электронного осциллографа. На горизонтальный вход осциллографа поступает напряжение, снимаемое с активного сопротивления  $r_0$ , которое включено последовательно с намагничивающей обмоткой  $w_1$ . Это напряжение пропорционально напряженности магнитного поля. На экране осциллографа в данном случае будет видна динамическая петля перемагничивания.

Благодаря высокой чувствительности электронных усилителей можно получать характеристики в диапазоне индукции от  $10^{-4}$  тл до индукции насыщения на частотах от промышленной до нескольких сотен килогерц. В зависимости от метода градуировки и определяемых характеристик погрешность измерения составляет 3—10%.

III. Для испытаний ферромагнитных материалов в квазистатическом режиме в последние годы широко применяют приборы с фотоэлектрическими усилителями (фотоэлектрические флюксметры). Принципиальная схема флюксметра показана на рис. 3.

Измерительная обмотка на образце 1 включена в цепь рамки зеркального магнитоэлектрического гальванометра 2 с небольшим периодом свободных колебаний. Последовательно с этой обмоткой включена одна из обмоток катушки взаимной индуктивности  $M$ , служащей для создания обратной связи, что позволяет расширить полосу пропускания флюксметра. Луч света, отраженный от рамки гальванометра, через призму падает на два одинаковых включенных встречно фотоэлемента 3 (или на дифферен-

циальный фотодетектор). Динамическая петля перемагничивания может быть зарисована на кальке или сфотографирована.

Координатные самописцы феррометров предназначены для записи динамических петель магнитномягких материалов на промышленной частоте. Диапазон измеряемых индукций для пермаллоев — примерно 0,1—0,7 тл, для листовой электротехнической стали 1,5—1,8 тл. Погрешность измерения  $\pm(3-5)\%$ .

II. Феррографы, или электронно-осциллографические устройства, предназначены для измерения, с записью на экране электронно-лучевой трубки, динамических петель перемагничивания (в том числе частных циклов), временных кривых индукции и напряженности магнитного поля, кривых зависимости дифференциальной проницаемости от напряженности магнитного поля и т. п. Принцип работы феррографа виден из рис. 2.

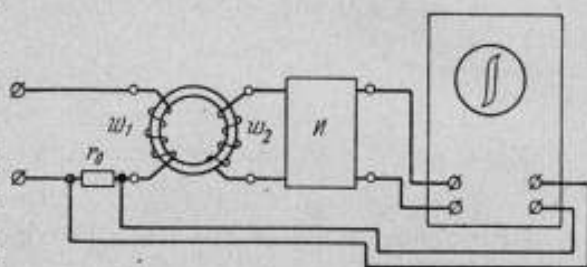


Рис. 2. Блок-схема феррографа.

циальный фотоэлемент). Когда ток в цепи гальванометра отсутствует, оба фотоэлемента освещены одинаково и их разностный ток равен нулю. При отклонении рамки (при протекании в ней тока) равновесие в освещенности фотоэлементов нарушается, на сетку электронной лампы 5 подается напряжение, вследствие чего в ней появляется анодный ток, проходящий через вторую обмотку катушки взаимной индуктивности и выходное устройство 4.

Анодный ток  $i_a$  электронной лампы пропорционален изменению магнитного потока  $\Delta\Phi$  (или индукции) в образце, сцепленного с измерительной обмоткой, так как отклонение подвижной рамки гальванометра, являющегося прибором средних значений, пропорционально э. д. с. в измерительной обмотке, которая, как уже говорилось, пропорциональна мгновенному значению индукции (магнитного потока).

Для получения квазистатических петель гистерезиса необходимы два фотоэлектрических флюксметра; напряжение на входе одного из них должно быть пропорционально  $\frac{dB(t)}{dt}$ ,

другого — пропорционально  $\frac{dH(t)}{dt}$ .

На выходе флюксметров должен быть включен двухкоординатный самописец. На вход двигателя, управляющего пером самописца, может быть подано напряжение, пропорциональное индукции в образце, а на вход двигателя, перемещающего бумажную ленту, — напряженности намагничивающего поля. Для получения основной кривой намагничивания необходимо снять семейство симметричных квазистатических петель гистерезиса.

Частота изменения напряженности магнитного поля при снятии квазистатических петель гистерезиса фотоэлектрическими усилителями может быть в пределах от десятых долей герца до нескольких герц. Чувствительность фотоэлектрических флюксметров примерно на порядок выше, чем баллистических гальванометров, и на три порядка выше, чем стрелочных флюксметров. По данным литературы (очевидно, преувеличенным в несколько раз), погрешность описанных установок может быть доведена до  $\pm 0,5\%$ .

IV. В последние годы получили развитие стробоскопические методы испытаний ферромагнитных материалов на частотах от промышленной до нескольких десятков килогерц. Схема и принцип работы стробоскопической установки показаны на рис. 4, а и б.

Сигнал 1 (напряжение  $U_{вх}$ ), поступающий на вход установки, преобразуется синхронным ключом СК в последовательные импульсы 2 (напряжение  $U_{и}$ ), подаваемые на вход импульсного усилителя ИУ. Период работы синхронного ключа на время  $\tau$  больше периода  $T$  исследуемого сигнала, причем  $\tau \ll T$ . Амплитуда последовательных импульсов 3 изменяется в соответствии с формой сигнала, поступившего на вход установки. С помощью схемы восстановления (в данном случае конденсатор, включенный параллельно выходу установки) форма сигнала восстанавливается при значительно большем его периоде 4. Период преобразованного сигнала (напряжение  $U_{вых}$ ) больше периода исследуемого сигнала в  $\frac{T}{\tau}$  раз. Таким обра-

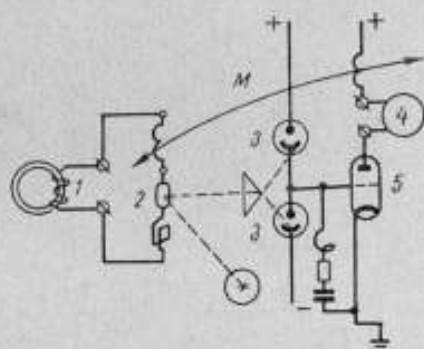


Рис. 3. Принципиальная схема фотоэлектрического флюксметра.

зом, сущность стробоскопического метода заключается в уменьшении частоты напряжения сигнала без изменения его формы, что позволяет увеличить точность измерений, а также записать на бумаге координатными самописцами изменение напряжения во времени.

При испытании ферромагнитных материалов необходимы два стробоскопических устройства (канала): одно для измерения индукции (в этом канале должен быть интегрирующий каскад, так как напряжение на обмотке образца пропорционально производной индукции по времени), другое — для измерения напряженности намагничивающего поля.

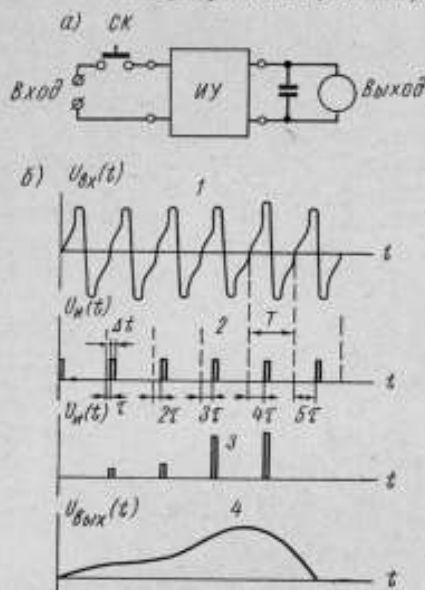


Рис. 4. Схема (а) и принцип работы (б) стробоскопической установки.

Стробоскопический метод позволяет снимать в широком диапазоне частот динамические петли перемагничивания (в том числе частные циклы), а также получать основную динамическую кривую намагничивания как геометрическое место вершин семейства симметричных петель.

#### Отечественные разработки аппаратуры

1. В Советском Союзе разработано несколько типов феррометров:

1. Феррометры ЛПИ и ВНИИМ [2] с координатными самописцами; принцип действия этих феррометров описан выше (изготовлено несколько экземпляров).

2. Установка У-542, выпускаемая серийно. В качестве самописца в комплект установки входит электронный осциллограф с интегратором на входе (феррограф), служащий для визуального наблюдения динамической петли перемагничивания [3].

Эти феррометры предназначены для испытания магнитномягких материалов на частоте 50 гц. На них определяют основную динамическую кривую намагничивания по максимальным значениям индукции и напряженности магнитного поля и по их первым гармоникам. Кроме того, этими приборами можно определять потери в испытываемых образцах. Погрешность измерений  $\pm 5\%$ . Феррометры обоих типов различаются в основном устройством механически управляемых выпрямителей.

3. Феррометр МЭИ [4], в котором механически управляемые выпрямители заменены электронным управляемым мостом. Этот прибор предназначен для испытания образцов из магнитномягких материалов в форме колец на частотах 40—60 и 400—600 гц. Погрешность измерений  $\pm 5\%$ . Недостатком прибора является необходимость дополнительного уравнивания электронного управляемого моста до измерений и во время измерений.

4. Феррометр Ф-2, разработанный в 1962 г. во ВНИИМ. Основной его элемент — фазочувствительный вольтметр на кремниевых диодах. Управляющее напряжение фазочувствительной схемы поступает от электронного генератора с кольцевым фазовращателем, питающимся от того же однофазного источника, что и намагничивающая обмотка образца [5]. Блок-схема Ф-2 представлена на рис. 5. На этом феррометре определяют



динамические петли и основные кривые намагничивания кольцевых образцов в диапазоне частот 50—10 000 гц с погрешностью  $\pm 5\%$ .

Существенным недостатком феррометров является сложность их изготовления, а следовательно, и высокая стоимость.

Феррометр У-542 может быть заменен более простым и универсальным прибором — вектометром Ц-50. Правда, на нем невозможно измерять характеристики по первым гармоникам  $B$  и  $H$ ; для этой цели используют другие приборы, в частности компенсаторы переменного тока.

II. В нашей стране разработано большое количество феррографов [1, 6—12], которые различаются типом интеграторов, схемами, коэффициентами усиления усилителей электронного осциллографа и др.

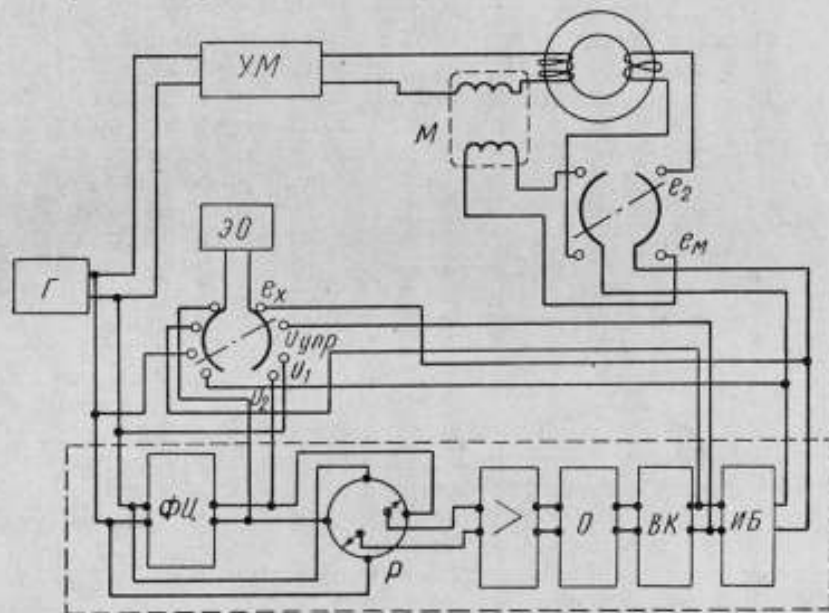


Рис. 5. Блок-схема феррометра Ф-2.

Г — генератор; УМ — усилитель мощности; ЭО — электронный осциллограф; ФЦ — фазосдвигающая цепь; Р — круговой резистор; О — ограничитель; ВК — выходной каскад; ИБ — измерительный блок;  $\epsilon_2$  — э. д. с., индуцированная в измерительной (вторичной) обмотке образца;  $\epsilon_M$  — э. д. с., индуцированная во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности М;  $\epsilon_x$  — измеряемая э. д. с. ( $\epsilon_2$  или  $\epsilon_M$ , в зависимости от положения переключателя);  $U_{упр}$  — управляющее напряжение;  $U_1, U_2$  — напряжения настройки фазосдвигающей цепи.

На наш взгляд, заслуживают внимания работы следующих авторов:

1. Г. С. Векслер [7] предложил потенциометр в цепи питания образца для создания пакета намагничивающих импульсов, позволяющий получать автоматически на экране осциллографа семейство динамических петель перемангничивания.

2. А. Г. Шишков, Ю. Д. Иванов и В. М. Гладков [9] осуществили электронную модуляцию по амплитуде намагничивающего синусоидального тока. Для получения основной кривой намагничивания они применили модуляцию яркости луча электронно-лучевой трубки. Подача импульсов подсветки производилась в момент достижения максимального значения тока.

Следует указать на недостаток этого метода получения изображения основной кривой намагничивания: может иметь место значительная погрешность измерений, если не совпадают по времени максимальные значе-

ния индукции  $B_m$  и напряженности поля  $H_m$  (верхняя часть петли закруглена).

З. И. И. Кифер и В. У. Маргулева [10] предложили одновременно с получением изображения на экране осциллографа измерять специальными приборами  $B_m$  и  $H_m$ , что дает возможность сразу получать масштабы по осям осциллографа и в несколько раз снизить погрешность измерений.

Феррографы используют в основном для испытания магнитномягких материалов на промышленной частоте, хотя и известны случаи их работы на частотах до нескольких десятков килогерц [13]. Таким образом, принципиально не представляет труда производить испытания на любой частоте (от промышленной до нескольких сотен килогерц) — для этого необходимо иметь достаточно широкую полосу пропускания усилителей в выбранном диапазоне частот, а также интегратор с соответствующими параметрами.

Феррограф может работать и на инфранизких частотах. Например, прибор для определения характеристик постоянных магнитов, описанный

П. П. Маркиным и П. И. Пеккером [8], работает на частоте 1 гц.

Недостатком феррографов является то обстоятельство, что они могут работать только в довольно узком диапазоне частот или в нескольких относительно близких диапазонах, если иметь набор интеграторов.

III. Нам неизвестны отчетственные разработки измерительных устройств для записи кривых намагничивания с применением фотоэлектрических усилителей, хотя промышленность выпускает фотоэлектрические усилители Ф-11, Ф-12, и Ф-117, флюксометры Ф-18 и М-199, а также двухкоординатные самописцы с фотоэлектрическими усилителями типа Н359. На основе фотоэлектрических усилителей и самописцев можно в относительно короткие сроки разработать установки для записи квазистатических кривых намагничивания.

Рис. 6. Блок-схема стробоскопической установки ДСШУ-М.

IV. В Советском Союзе создана стробоскопическая установка ДСШУ-М для магнитных измерений [14], блок-схема которой приведена на рис. 6. Источником питания 1 служит звуковой генератор ЗГ-12М с тремя усилителями СМУ-250, которые могут включаться параллельно или последовательно. На вход канала стробоскопического преобразователя сигнала напряженности поля 5 подается напряжение с измерительного сопротивления  $r_0$ , включенного в намагничивающую цепь испытуемого кольцевого образца. Преобразованное напряжение низкой частоты поступает на горизонтальный вход электронного автоматического компенсатора 4. На вход канала стробоскопического преобразователя сигнала магнитной индукции 2 подается напряжение с вторичной обмотки образца. Входное напряжение интегрируется интегратором 3, применяемым в электронно-счетной машине МПТ-9М. С выхода интегратора сигнал поступает на вертикальный вход автоматического компенсатора 4.

Одним из достоинств установки ДСШУ-М является возможность интегрирования сигнала после преобразования, что позволяет иметь в схеме один интегратор на весь диапазон частот и исключает частотные погрешности интегрирования.

Установка предназначена для испытания кольцевых образцов из магнитномягких материалов в диапазоне частот 50—20 000 гц. Посредством ее записывают динамические кривые перемагничивания (семейства

симметричных динамических петель), а следовательно, определяют основную кривую намагничивания и частные циклы (петли) при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями. Погрешность измерений, по данным Л. В. Мительмана [14], не превышает  $\pm 4\%$ .

Л. В. Мительман и Н. А. Семенова [15] установили возможность определения характеристик перемагничивания сплавов с прямоугольной петлей гистерезиса с указанной выше погрешностью в диапазоне частот до 10 кГц. На наш взгляд, установка ДСШУ-М является одной из наиболее перспективных для магнитных измерений. При разработке промышленного варианта необходимо дополнить ее пермеаметрами для различных частот и материалов, а также программирующим устройством для полной автоматизации процесса измерений.

В настоящее время промышленность начала выпускать стробоскопическую установку типа Е-11-1.

### Зарубежные разработки аппаратуры

I. Из зарубежных наиболее известен феррометр фирмы «Сименс», промышленное изготовление которого началось в 40-х годах и продолжается до сих пор. Практически он не отличается от отечественных феррометров ЛПИ и ВНИИМ.

Фирма «Сименс» выпускает также векторметр — прибор для измерения средних значений напряжения, аналогичный отечественному Ц-50, который может быть использован для определения максимальных значений  $B_m$  и  $H_m$  и для снятия динамической петли на частоте 50 Гц.

Гейгер [16] разработал феррометр с полупроводниковыми фазочувствительными выпрямителями, работающий на частоте 20 кГц.

II. В зарубежной литературе описано много схем феррографов, работающих на частотах от промышленной до нескольких десятков килогерц [13, 17—25]; большая часть их работает на частоте 50 или 60 Гц. Известны три типа феррографов, выпускаемых серийно: феррограф типа 1.032 института Фестера (ФРГ), ферротестер двухлучевой типа 2738/5—3 фирмы «Орион» (Венгрия), работающий на частотах 20—500 Гц, и феррограф фирмы «Тесла» (Чехословакия) — на частоте 50 Гц. Эти приборы различаются схемами усилителей, размером и типом электронно-лучевой трубки, а также схемами интеграторов. Наиболее совершенным с точки зрения исполнения нам представляется феррограф института Фестера.

Феррограф 1.032 состоит из нескольких блоков. Основной блок включает в себя электронно-лучевую трубку с усилителями по обоим каналам, интегратор в вертикальном канале и блок градуировки. Кроме того, в комплект прибора входят блок питания с плавной регулировкой намагничивающего тока, намагничивающие приспособления и электронный ваттметр. Пределы измерений феррографа можно устанавливать по индукции и напряженности намагничивающего поля. Для этого при каждом значении коэффициента усиления, определяемого соответствующими делителями напряжения, перед измерениями устанавливают с помощью известного напряжения масштабы (по осям) по длине световой линии на экране осциллографа. При наблюдении динамической петли достаточно измерить абсциссу и ординату ее точек, чтобы иметь возможность рассчитать по простым формулам индукцию и напряженность магнитного поля. Для испытания образцов в форме пластин и прутков применяют соленоиды, а также приспособления для намагничивания торондов и др. Потери могут быть определены по площади динамической петли или электронным ваттметром.

Из других феррографов интерес представляют приборы Фазала [26], Лисовского и Лаховича [27]. Феррограф Фазала предназначен для контроля полос трансформаторной стали на частоте 60 гц. При измерении нескольких сложенных в пакет полос в них просверливают отверстие диаметром 3 мм, в которое вставляют медную трубку длиной 50—65 мм, служащую измерительным витком. Намагничивание производят коаксиальным стержнем (первичной обмоткой), который вставляют в трубку и изолируют от нее. Последовательно с намагничивающим стержнем включают образцовое сопротивление, напряжение с которого подают на горизонтальный вход осциллографа. Напряжение на трубке перед интегрированием повышают специальным усилителем, в котором предусмотрена коррекция фазового сдвига между выходами на горизонтальные и вертикальные пластины.

На образцах в виде пластин производят только относительные измерения; для абсолютных же нужны кольцевые образцы. В работе [27] описана аппаратура для осциллографирования динамических петель тонких ферромагнитных пленок. При измерениях используется треугольная форма кривой напряженности магнитного поля. Вместе с амплитудой напряженности поля изменяется частота следования импульсов, тем самым сохраняется постоянная скорость нарастания напряженности поля. По данным Лисовского и Лаховича, это позволяет избежать искажений петли, имеющих место при обычном способе осциллографирования.

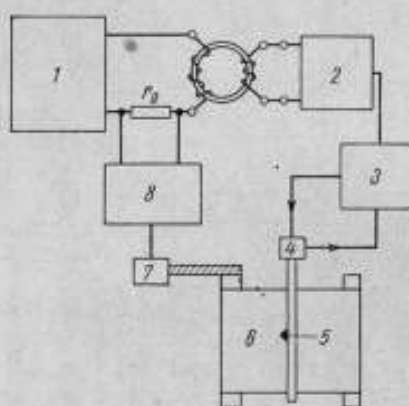


Рис. 7. Блок-схема установки с фотоэлектрическим усилителем.

III. Известно большое количество публикаций с описанием самописцев с фотоэлектрическими усилителями (флюксометрами) для определения квазистатических характеристик ферромагнитных материалов на частотах от долей герца до нескольких герц [28—33]. Максимальная напряженность намагничивающего поля в описанных устройствах достигает 80 кА/м, т. е. они могут быть применены для определения характеристик магнитножестких материалов типа мартенситных сталей.

В качестве примера приведем блок-схему одной из установок [8] с фотоэлектрическим усилителем (рис. 7).

Кольцевой образец получает питание от источника инфранизкой частоты — генератора 1. Сервоусилитель 8, на выходе которого расположен серводвигатель 7, приводящий в движение бумагу самописца, питается напряжением на сопротивлении  $r_0$ , пропорциональным намагничивающему току. Поскольку в кольцевом образце напряженность магнитного поля и намагничивающий ток пропорциональны, то перемещение бумаги самописца пропорционально им. Э. д. с. в измерительной обмотке образца повышается фотоэлектрическим усилителем 2 с коэффициентом усиления, равным  $10^3$ , и интегрируется двигателем переменной скорости 3 с линейной зависимостью скорости от приложенного напряжения. Двигатель 3 связан с тахогенератором 4, который подает дифференцированный сигнал как напряжение отрицательной обратной связи в схему управления интегрирующим двигателем. Последний связан с пером самописца 5. Погрешность измерения  $\pm 1\%$ .

Последний связан с пером самописца 5. Погрешность измерения  $\pm 1\%$ .

Погрешность измерения  $\pm 1\%$ .

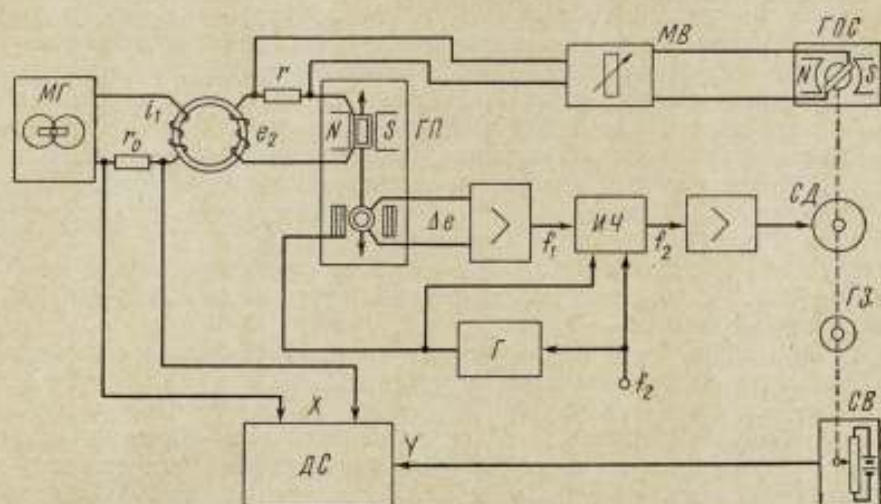


Рис. 8. Блок-схема установки SRB-14B.

МГ — мотор-генератор; ГП — гальванометрический преобразователь, МВ — установка масштаба индукции В; ГЭС — генератор обратной силы; СД — серводвигатель; ГЗ — генератор затуханий; СВ — сигнал индукции В; ДС — двухкоординатный самописец; Г — генератор 10 кГц; ИЧ — инвертор частоты;  $I_1$  и  $I_2$  — частоты, равные соответственно 10 кГц и 50 гц.

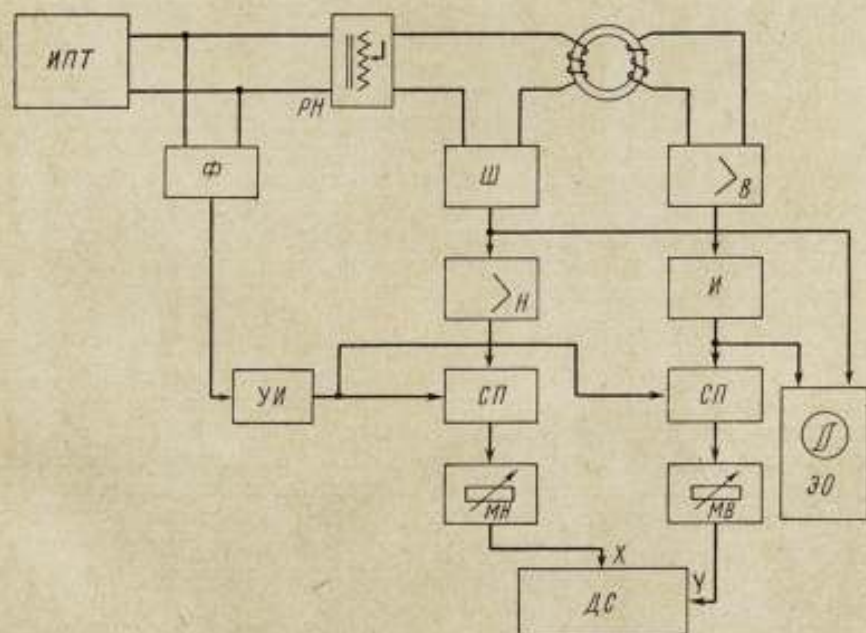


Рис. 9. Блок-схема установки SRB-32.

ИПТ — источник переменного тока; Ф — фазовращатель; РН — регулятор напряжения; Ш — шунт; И — интегратор; СП — стробоскопические преобразователи; МН и МВ — установки масштаба напряженности поля Н и индукции В; ЭО — электронный осциллограф; ДС — двухкоординатный самописец; УИ — усилитель импульсов.

На рис. 8 приведена блок-схема установки SRB-14B, выпускаемой электротехническим заводом «Иокогава» (Япония). В установке имеется входной преобразователь гальванометрического типа, являющийся интегратором и преобразующий постоянное напряжение сигнала в переменное. После преобразования и усиления сигнал подается на серводвигатель, управляющий кареткой самопишущего координатного прибора. Напряжение с измерительного сопротивления  $r_0$ , пропорциональное напряженности намагничивающего поля, приводит в движение перо самописца.

Установка позволяет записывать семейство симметричных гистерезисных петель. Время записи одной петли регулируют от 2 до 20 мин. Пределы измерений по магнитному потоку 0,1—50 вб, приведенная погрешность — не выше  $\pm 2\%$ ; пределы по напряженности магнитного поля 0,8—8000 а/м, погрешность — не выше  $\pm 0,5\%$ .

IV. Зарубежные стробоскопические установки [34] мало отличаются от описанной выше отечественной установки ДСШУ-М. На рис. 9 приведена блок-схема установки типа SRB-32, выпускаемой электротехническим заводом «Иокогава». Пределы измерений по частоте 50 гц—10 кгц; по напряженности магнитного поля 4—800 а/м. Приведенная погрешность по напряжению и току — не выше  $\pm 3\%$ . Продолжительность испытаний 0,5—10 мин.

#### Заключение

Из описанных четырех типов устройств для наблюдения и записи кривых намагничивания наиболее перспективны два последних.

Для определения квазистатических характеристик ферромагнитных материалов следует разработать самописцы с фотоэлектрическими усилителями; для определения динамических характеристик — стробоскопические установки.

В связи с быстрым развитием современной техники и возросшими требованиями к магнитным характеристикам нецелесообразно выпускать сложные и дорогостоящие приборы — феррометры, работающие только на промышленной частоте. Их выпуск следует прекратить, как нам представляется, после широкого внедрения в промышленность фотоэлектрических и стробоскопических установок. В тех случаях, когда необходимо по точкам определять динамические характеристики на промышленной частоте, может быть использован более дешевый и универсальный прибор — векторметр (например, Ц-50).

Необходимо начать разработку отдельных элементов феррометра для широкого диапазона частот: фазочувствительных выпрямителей, катушек взаимной индуктивности, усилителей мощности. Важно также обеспечить выпуск фазочувствительных вольтметров на частоты до 20 кгц.

Феррограф дает возможность непосредственно наблюдать динамические (предельные и частные) петли, кривые дифференциальной проницаемости и др. Очевидно, для качественного определения характеристик он очень удобен. Однако вряд ли следует рекомендовать промышленный выпуск феррографов в виде отдельных установок, как например, феррографа Фестера или др.

Необходимы разработка и изготовление большого количества приставок (в основном интегрирующих) к серийным осциллографам на различные частоты, а также высокочувствительных вольтметров амплитудных и средних значений, используемых в тех случаях, когда требуется градуировка каналов феррографа, составленного из отдельных блоков. Наряду с этим необходимы разработка и серийный выпуск самописцев с фотоэлектрическими усилителями.

Следует развернуть работу по усовершенствованию и упрощению схем и конструкций стробоскопических установок, полностью их автоматизировать и ускорить серийное производство. Преимущества этих установок — в высокой точности измерений и универсальности (возможность испытания различных материалов), в получении результата измерений непосредственно на бумаге, а следовательно, сведении расчетов к минимуму. Вместе с тем необходимо разрабатывать различные намагничивающие устройства (пермеаметры) к таким установкам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М.—Л., ГЭИ, 1962.
2. Шрамков Е. Г. Приборы для комплексных исследований и испытаний ферромагнитных материалов. Научно-техническое совещание работников промышленности, деятелей науки и техники, вып. 85. Л., 1951.
3. Левин М. Э. Феррометр У-542. Сб. работ Министерства электротехнической промышленности СССР по механизации и автоматизации народного хозяйства. М., 1956.
4. Шарохин Г. И. Измерение магнитных характеристик с помощью феррометра и анализ опытных кривых с применением шаблонов. Автореферат диссертации. МЭИ, 1953.
5. Чечурина Е. Н. Фазочувствительный вольтметр для определения гистерезисных кривых на переменном токе. «Измерительная техника», 1962, № 6.
6. Мосткова Г. П. Снятие гистерезисных петель на катодном осциллографе. «Заводская лаборатория», 1951, № 11.
7. Векслер Г. С. Метод получения основной кривой намагничивания. «Электричество», 1952, № 10.
8. Маркин П. П. и Пеккер П. И. Ферротестер для постоянных магнитов. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
9. Шишков А. Г., Иванов Ю. Д. и Гладков В. И. Прибор для осциллографического измерения динамической кривой намагничивания ферромагнетиков. «Электричество», 1962, № 2.
10. Кифер И. И., Маргулева В. У. Об осциллографическом методе испытания магнитномягких материалов. «Заводская лаборатория», 1959, № 4.
11. Розенблат М. А. Магнитные усилители. «Советское радио». М., 1956.
12. Васюткина Т. И., Юрченко В. М. Исследование ферритовых сердечников в квазистатическом режиме. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
13. Kühne R. «Zs. angew. Phys.», 1954, V. 6, № 3.
14. Мительман Л. В. Двухкоординатная широкополосная установка типа ДСПУ-М для записи кривых намагничивания ферромагнитных материалов в динамическом режиме. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
15. Мительман Л. В., Семенова Н. А. Динамические петли намагничивания сплавов 65НП и 79НМ при частотах до 10 кГц. «Электричество», 1963, № 9.
16. Geuger W. A. «Electronics», 1956, v. 29, № 10.
17. Adler R. «Electronics», 1943, v. 16, № 11.
18. Kreielsheimer K. «J. scient. instrum.», 1942, v. 19, № 9.
19. Crittenden E. C., Smith C. S., Olsen L. O. «Rev. sci. instrum.», 1946, v. 17, № 10.
20. Zamsky J. «Electrical Engineering», 1947, v. 66, № 7.
21. Scherb M. V. «Rev. sci. instrum.», 1948, v. 19, № 7.
22. Eittinger G. M. «Electronics», 1953, v. 76, № 3.
23. Bonn T. H., Torrey R. D., Bernstein F. «Electronics», 1958, v. 31, № 3.
24. Wiegand D. E., Hansen W. W. «AIEE Transactions», 1947, v. 66, № 3.
25. Lord H. W. «Electrical Engineering», 1952, v. 71, № 6.
26. Fasal I. H. «Electron. World», 1963, v. 69, № 5.
27. Lisowski B., Lachowicz H. «Arch. elektrotechnik», 1962, v. 11, № 4.
28. Ross M. A. «Proc. Inst. El. Engineers», 1954, v. 101, № 82, p. 11.
29. Lerond P., Thulin A. «J. sci. instrum.», 1959, v. 36, № 9.
30. Cioffi P. P. «Rev. sci. instrum.», 1950, v. 21, № 7.
31. Berge R. I., Guderjahn C. A. «Electronics», 1954, v. 27, № 7.
32. Edgar R. F. «Electrical Engineering», 1937, v. 56, № 7.
33. Rawlinson E. «Metrop.—Vickers Gazette», 1952, v. 24, № 399.
34. Gooder A. W. «J. British IRE», 1956, v. 16, № 1.

**МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ПЕРЕМЕННЫМ ПЕРИОДИЧЕСКИМ  
ПОЛЕМ СВЕРХЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ**

В статье рассмотрены методы и аппаратура для испытаний высокочастотных материалов, таких как магнитодиэлектрики, ферриты и металлические материалы сверхтонкого проката, при намагничивании переменным периодическим полем частотой до 1 Мгц. Эту аппаратуру используют для исследования нормальных образцов, при разработке новых высокочастотных материалов и применении их в различных областях техники, а также для контроля качества материалов согласно требованиям нормативных документов (стандартов и технических условий) и для получения справочных данных.

Основными характеристиками магнитномягких материалов на переменном токе сверхзвуковых частот являются зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля и частоты (динамические кривые намагничивания) и потери энергии в образце (удельные потери или тангенс угла потерь). Потери энергии представляют в виде функции магнитной индукции или напряженности магнитного поля и частоты.

Чтобы можно было судить о требованиях, предъявляемых к аппаратуре для оценки свойств высокочастотных материалов, целесообразно рассмотреть данные таблицы. Она составлена на основании соответствующих нормативных документов, а также данных литературы и результатов магнитных измерений, произведенных во ВНИИМ.

Наиболее простыми методами определения магнитных характеристик с минимальной затратой времени являются такие, при которых используют электроизмерительные приборы непосредственной оценки (вольтметры, амперметры, ваттметры)\*. Рассмотрим практические возможности применения этих методов при сверхзвуковых частотах.

В области магнитных измерений широко используют вольтметры средних значений, однако наша промышленность выпускает эти приборы только для частот до 10 кгц (например, вольтметр типа Ф-517 класса точности 1,5). Если ферромагнитный материал испытывают в слабых магнитных полях или он имеет значительные потери на вихревые токи (по отношению к общим потерям), то можно пользоваться любым вольтметром (для измерения средних, действующих или максимальных значений напряжения), работающим в соответствующем диапазоне частот, так

\* Схемы для измерений магнитных характеристик см. на стр. 19—21.



Характеристики	Пределы измерения характеристик			
	магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа	альсифероф	ферритов	железоникелевого сплава ***
1	2	3	4	5
Частота измерения, кГц	10—1000 *	10—100*	100—1000*	20—1000
Напряженность поля, а/м	1—100	1—100	0,5—10	0,1—10
Относительная магнитная проницаемость	10—60	20—90	100—4000	20000—4000
Магнитный поток **, вб	$5 \cdot 10^{-10}$ — $3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-9}$ — $5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-9}$ — $5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-9}$ — $1 \cdot 10^{-6}$
Потери **, вт	$2 \cdot 10^{-10}$ — $6 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$ —0,1	$6 \cdot 10^{-9}$ —3	$3 \cdot 10^{-4}$ —3
Суммарный тангенс угла потерь	$2 \cdot 10^{-4}$ — $1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-1}$	$2 \cdot 10^{-3}$ — $6 \cdot 10^{-1}$	0,2—1
Коэффициент потерь на гистерезис, $a^{-1} \cdot м$	$(0,1 \div 30) \cdot 10^{-6}$	$(1 \div 7) \cdot 10^{-6}$	$(4 \div 4000) \cdot 10^{-6}$	—
Коэффициент потерь на вихревые токи, $гц^{-1}$	$(1 \div 100) \cdot 10^{-9}$	$(10 \div 1000) \cdot 10^{-9}$	$(3 \div 1000) \cdot 10^{-9}$	—
Коэффициент дополнительных потерь	$(2 \div 20) \cdot 10^{-4}$	$(10 \div 30) \cdot 10^{-4}$	$(25 \div 500) \cdot 10^{-4}$	—
Относительный температурный коэффициент магнитной проницаемости, $град^{-1}$	$(20 \div 100) \cdot 10^{-6}$	$(50 \div 200) \cdot 10^{-6}$	$(1000 \div 10\ 000) \cdot 10^{-6}$	$(1000 \div 10\ 000) \cdot 10^{-6}$

\* Согласно нормативным документам.  
 \*\* Подсчеты произведены для образца среднего диаметра  $d_{ср} = 3$  см с поперечным сечением  $S = 0,5$  см<sup>2</sup> при частотах и напряженностях поля, указанных в гр. 2—5 (строки 1 и 2).  
 \*\*\* Сплав марки 79НМ при толщине проката 2,5 мм.

как в этом случае искажения формы кривой э. д. с. в измерительной обмотке образца незначительны.

Для сверхзвуковых частот применяют главным образом электронные вольтметры; их существенный недостаток — низкая точность измерения (класс точности 2,5 и ниже).

В настоящее время начат выпуск компенсационных вольтметров типа ВЗ-9 на базе вольтметра ОКВ-5, разработанного во ВНИИМ. Прибор ВЗ-9 высокого класса точности, его относительная погрешность  $\pm(0,2 + \frac{0,08}{U_x})\%$  (где  $U_x$  — измеряемое напряжение, в). Однако он сложен в обращении, и процесс измерения относительно длителен.

Из зарубежных следует отметить вольтметры фирмы «Брюль и Кьер» (Дания) для измерения действующих, средних и максимальных значений напряжения, погрешность которых в диапазоне частот 2 гц—200 кгц не превышает  $\pm 1\%$ , а также вольтметры фирмы «Вейне Керр» (Англия) с погрешностью  $\pm 2\%$  в диапазоне частот 20 гц—100 кгц.

Силу тока на сверхзвуковых частотах измеряют в основном термоэлектрическими амперметрами. Отечественная промышленность выпускает милли- и микроамперметры типов Т-13, Т-15, Т-18 и Т-133 класса точности 1—1,5.

Малокосинусные ваттметры для измерения потерь на сверхзвуковых частотах в Советском Союзе не выпускаются. Из ваттметров с номинальным

коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 1$  можно указать электронный типа ЭВ-1, приведенные погрешности которого составляют  $\pm 5\%$  в диапазоне частот 50 гц—20 кгц и  $\pm 10\%$  в диапазоне 20—200 кгц. Недавно разработан термоэлектрический ваттметр типа Т-140 с погрешностью при  $\cos \varphi = 1$ , не превышающей  $\pm 5\%$  в номинальной области частот (верхняя граница этой области зависит от пределов измерений и колеблется от 10 до 1000 кгц).

При использовании указанных выше приборов погрешность определения потерь в магнитном материале с учетом вида функциональной

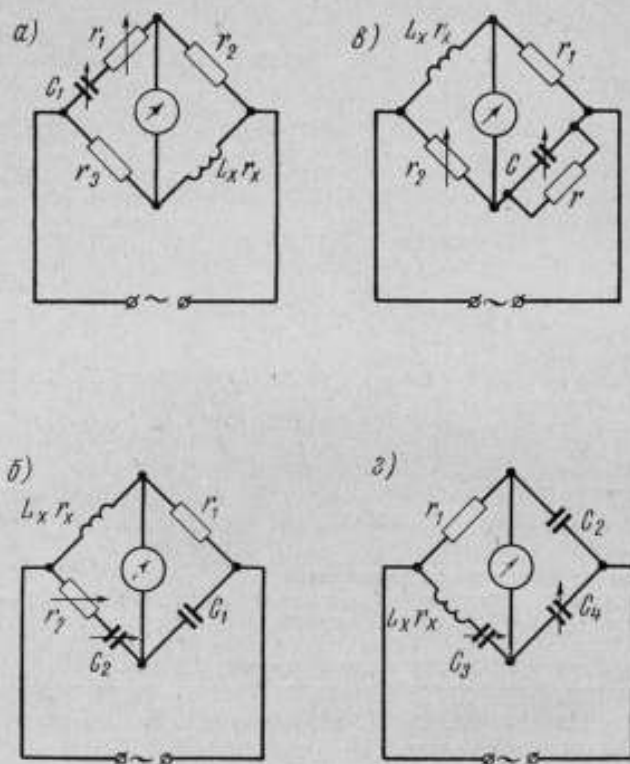


Рис. 1. Схемы мостов Оуэна (а), Хэя (б), Максвелла—Вина (в) и Шеринга (г).

зависимости удельных потерь от максимального значения синусоидальной магнитной индукции  $p = F(B_m)$ , очевидно, составит недопустимо большую величину — не менее 25%. Предельные же погрешности магнитной индукции в одной точке динамической кривой намагничивания  $B_{max} = F(H_{max})$  (где  $H_{max}$  — максимальная напряженность магнитного поля при любой форме кривых  $B$  и  $H$ ) и магнитной проницаемости кривой  $\mu = F(H_{max})$  составят соответственно около 10 и 13%, если принять погрешности определения линейных размеров образцов и площади поперечного сечения соответственно 1 и 2% (при измерении всеми приборами, кроме компенсационных вольтметров).

Таким образом, наиболее простой метод определения магнитных характеристик материалов на сверхзвуковых частотах не может обеспечить в настоящее время получение достаточно точных данных. С этой точки зрения предпочтительнее мостовой метод.

Выбор схемы моста зависит от диапазона частот, вида и сорта материала, режима намагничивания, конечной цели измерений (получение, например,

суммарного тангенса угла потерь материала или коэффициентов потерь), допустимых погрешностей измерений и т. д.

В Советском Союзе выпускают установки типа У-5017 для определения мостовым методом магнитной проницаемости и тангенса угла потерь материала при фиксированных частотах — от 400 до 9600 гц. В основу установок положены схемы мостов Овена (при синусоидальной напряженности поля) и Хэя (при синусоидальной магнитной индукции), изображенные на рис. 1, а, б. Погрешности измерений индуктивности  $L_x$  на установке составляют  $\pm 2\%$  при частоте  $f < 1000$  гц и не превышают  $\pm 3\%$  при  $f > 1000$  гц, а погрешности сопротивления  $r_x$  составляют  $\pm 5\%$ , если тангенс угла потерь  $\text{tg } \delta_x = 0,2 \div 2$ , и  $\pm \frac{1}{\text{tg } \delta_x} \%$ , если  $\text{tg } \delta_x = 0,04 \div 0,2$ .

Для определения магнитных характеристик при высоких индукциях (до индукции насыщения) мосты по схемам Овена и Хэя изготавливают зарубежные фирмы [1]. По данным работы [2], погрешности измерений составляют  $\pm 3\%$  при  $f = 60$  гц,  $\pm 5\%$  при  $f \leq 10$  кгц и  $\pm 10\%$  — при  $f \leq 200$  кгц.

В Советском Союзе еще не выпускаются серийно мостовые установки для испытания магнитных материалов на сверхзвуковых частотах. За рубежом наибольшее распространение для частот до 100 кгц получили мосты по схеме Максвелла — Вина (рис. 1, в), в которых в качестве переменных элементов использованы емкость  $C$  и сопротивление  $r$  [3]. Их изготавливают фирмы «Сименс» (ФРГ), «Тесла» (ЧССР), «Функверк Эрфурт» (ГДР), «Анго электрик» (Япония) и другие; погрешности измерений  $\pm (1 \div 5)\%$  (согласно данным соответствующих каталогов). На частоте выше 100 кгц предпочтительнее применять схемы, в которых регулируемые элементы являются только емкости. Такую аппаратуру выпускает, например в США, фирма «Дженерал радио» (типы 916-А и 1606-А) по схеме, показанной на рис. 1, г [4]. Предназначена эта аппаратура для измерения составляющих полных сопротивлений  $Z$  в диапазоне частот 0,4—60 Мгц с погрешностью  $\pm (1 \div 2)\%$ . Погрешности измерений магнитных характеристик составляют здесь  $\pm (6 \div 10)\%$  [5].

Фирма «Вейне Керр» (Англия) изготавливает мосты по трансформаторной схеме (рис. 2) для измерения индуктивностей, сопротивлений и емкостей на частотах 15 кгц—5 Мгц с погрешностью  $\pm 1\%$  [6].

Симметрирование и экранирование мостовых схем на высоких частотах значительно упрощается с применением Т-образных схем (рис 3, а) [7—10]. Американская фирма «Дженерал радио» изготавливает мосты по одной из таких схем для работы на частоте до 30 Мгц [8]. В СССР, в Новосибирском государственном институте мер и измерительных приборов (НГИМИП), разработано несколько типов измерителей полной проводимости по схемам двойных Т-образных мостов на частоте до 250 Мгц [11, 12].

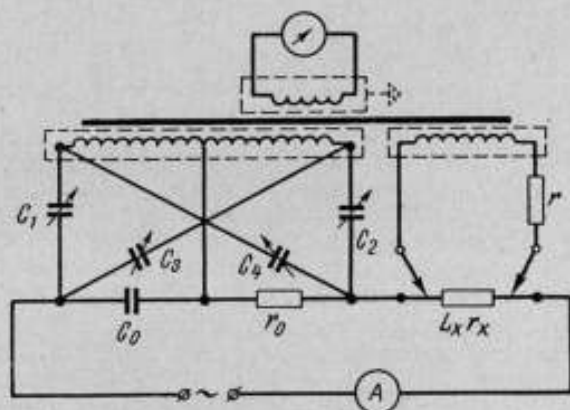


Рис. 2. Схема трансформаторного моста.

Большая часть из перечисленных выше установок не предназначена специально для магнитных измерений. Чтобы использовать их в этой области, необходима дополнительная аппаратура, определяющая силу тока в обмотке образца при подсчете напряженности поля; следует учитывать допустимую мощность рассеяния в элементах плеч. Поэтому далеко не все мосты дают возможность измерять с необходимой точностью коэффициенты

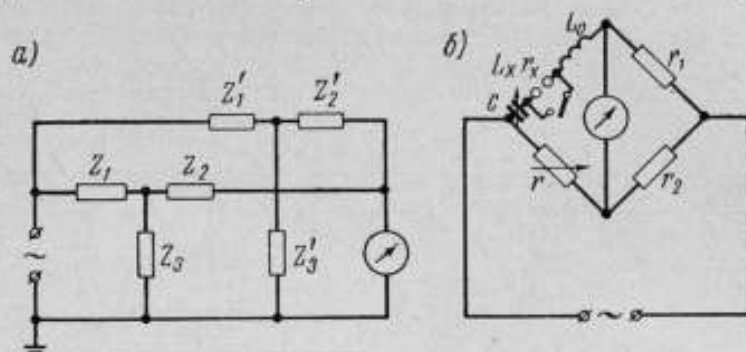


Рис. 3. Т-образная (а) и резонансная (б) схемы.

потерь, особенно со столь малыми числовыми значениями, как например, у магнитодиэлектриков на основе карбонильного железа.

Фирма «Тесла» разработала и изготовила небольшое количество мостовых установок типа М-21 ( $f < 30$  кГц) и М-20 ( $f < 250$  кГц) с погрешностями определения коэффициентов потерь  $\pm(10-20)\%$  и индуктивности (для подсчета магнитной проницаемости)  $\pm 2\%$ . Мост типа М-20 имеет резонансную схему (рис. 3, б), широко

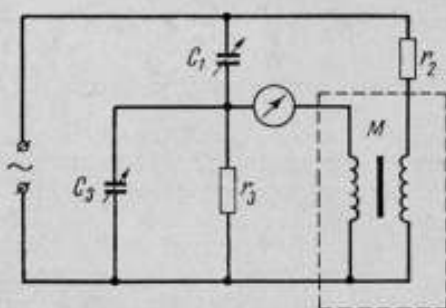


Рис. 4. Схема моста Вильде.

применяемую для испытания ферритов и магнитодиэлектриков [13-17]. По этой схеме в СССР изготовлено несколько мостовых установок (УИММ-1, УИММ-2, УИММ-3). Погрешности измерений индуктивности и сопротивления потерь катушек с ферромагнитными сердечниками составляют соответственно  $\pm 1$  и  $\pm 5\%$  в диапазоне частот 20 кГц—1 МГц при напряженностях магнитного поля 0,1—100 а/м (порядка 0,001—1 э).

Резонансная схема, вполне пригодная для определения зависимости проницаемости и тангенса угла потерь материалов от напряженности магнитного поля и частоты, не всегда дает возможность с достаточной точностью определить коэффициент дополнительных потерь. Для этой цели целесообразно применять схему с взаимной индуктивностью  $M$  (рис. 4), по которой разработан мост М-21 [18].

Во ВНИИМ созданы установки УИМ-1 и УВИМ-1 для определения магнитной проницаемости и коэффициентов потерь высокочастотных ферромагнетиков в полях напряженностью 0,1—100 а/м (порядка 0,001—1 э), диапазон частот 10 кГц—1 МГц. В основу этих установок, как и М-20 и М-21, положены схемы — резонансная и с взаимной индуктивностью [19, 20]. Погрешности измерений резонансным мостом (УИМ-1) не превышают по индуктивности  $\pm 0,2 \left(1 + \frac{100}{L}\right)\%$  и по сопротивлению в диа-

пазоне  $1-10 \text{ ом} \pm 1\%$  при воспроизводимости измерений соответственно  $0,03$  и  $0,2\%$ . Предельная погрешность единичного измерения магнитной проницаемости не более  $\pm 0,6\%$  (без учета погрешности определения геометрических размеров образца), коэффициентов потерь на вихревые токи ( $q_v \geq 1 \cdot 10^{-9} \text{ гц}^{-1}$ ) и гистерезис ( $q_r \geq 1 \cdot 10^{-6} \text{ м/а}$ )  $\pm 10\%$ . Предполагается, что измерения производят в широком диапазоне частот и напряженностей поля, числовые значения которых отличаются примерно на порядок (например,  $100$  и  $1000 \text{ кгц}$ ,  $10$  и  $100 \text{ а/м}$ ). Погрешности же определения коэффициента дополнительных потерь  $q_d \approx 2 \cdot 10^{-4}$  могут достигать больших значений — до  $100\%$ .

В связи с этим  $q_d$  следует определять на установке УВИМ-1. Пределы измерений по взаимной индуктивности здесь составляют  $50-500 \text{ мкгн}$  и по углу потерь  $2 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-2}$  при частотах  $10-50 \text{ кгц}$ . Погрешности определения  $M$  не превышают  $\pm 0,3\%$ , а  $q_d \geq 2 \cdot 10^{-4}$  и  $q_r \geq 1 \cdot 10^{-6} \text{ м/а}$  не превышают  $\pm 10\%$ . Описанная выше измерительная аппаратура позволяет определять также температурные коэффициенты магнитных характеристик, если испытуемый образец поместить в камеру, где создаются положительные и отрицательные температуры ( $-60$ )  $\div$  ( $+200$ )  $^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, на этой аппаратуре можно определять все основные характеристики высокочастотных материалов согласно действующим нормативным документам, а также справочные характеристики. Однако она довольно сложна, и испытания занимают много времени (с учетом затраты времени на намотку кольцевых образцов и на внесение поправок в результаты измерений). Поэтому целесообразно создавать такие установки, на которых можно было бы испытывать образцы без предварительного нанесения на них обмоток, помещая образцы в закороченные на конце отрезки коаксиальных линий (коаксиальные держатели) или высокочастотные пермеаметры. В настоящее время этой методикой пользуются в СССР (НГИМИП) при определении магнитной проницаемости и тангенса угла полных потерь материала в диапазоне частот от  $500 \text{ кгц}$  до сотен мегагерц, когда напряженности магнитного поля соответствуют области начальной проницаемости. В зарубежной литературе приводятся сведения о разработке и применении аппаратуры для измерения малых сопротивлений и индуктивностей при намагничивании одним витком. Так, в ряде работ [21—23] Национального бюро стандартов США описан метод одновиткового намагничивания, который может быть распространен и на низкие частоты, начиная от  $1 \text{ кгц}$ . Специально сконструированный для этой цели мост по схеме Максвелла—Вина [21] дает возможность измерять в диапазоне частот  $1-100 \text{ кгц}$  индуктивность  $10^{-9}-10^{-6} \text{ гн}$ , сопротивление потерь  $10^{-6}-0,1 \text{ ом}$  и тангенс угла потерь  $10^{-2}-10$ . При этом погрешности составляют: индуктивности  $\pm 1\%$ , сопротивления и тангенса угла потерь  $\pm (5 \div 10)\%$ .

Схема Максвелла—Вина была применена и для определения составляющих комплексной начальной магнитной проницаемости при одновитковом намагничивании в диапазоне частот  $0,1-30 \text{ Мгц}$  [24]. При этом индуктивность измеряли в пределах  $4 \cdot 10^{-8} \div 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ гн}$ , сопротивление потерь  $10^{-2}-0,5 \text{ ом}$  и тангенс угла потерь  $10^{-2}-3$  с погрешностями соответственно:  $\pm 2\% + 10^{-11} \text{ гн}$ ,  $10^{-4} \text{ ом}$  и  $\pm 4\% + 5 \cdot 10^{-4}$ .

Одновитковое намагничивание на сравнительно низких частотах используют и в Советском Союзе, например в НГИМИП [25] (как на аппаратуре, предназначенной для одной частоты, так и для широкого диапазона частот). Однако у автора нет достоверных сведений о погрешностях измерений на такого рода установках.

Магнитные характеристики на сверхзвуковых частотах определяют, помимо описанных выше методов, резонансным методом.

В этом случае образец с намагничивающим устройством (обмотка, рамка, отрезок коаксиальной линии, высокочастотный пермеаметр и т. п.) включают в резонансный контур; настраивая последний в резонанс, измеряют добротность и индуктивность, т. е. тангенс угла потерь и магнитную проницаемость материала образца [26]. На резонансном принципе работы основаны широко распространенные приборы — измерители добротности (куметры). Погрешности градуировки их шкал емкостей, по которым определяют индуктивность, составляют  $\pm (1-4)\%$ , в зависимости от величины емкости; погрешности измерений добротности — примерно  $\pm 10\%$ . Измерения на куметрах производят при постоянном напряжении, при этом ток (напряженность поля) получают различным, в зависимости от частоты и параметров испытуемой индуктивности. Это обстоятельство, а также большие погрешности измерения добротности (тангенса угла потерь материала) не позволяют применять резонансный метод и соответствующую аппаратуру для определения коэффициентов потерь. Резонансный метод измерения магнитных характеристик используют главным образом при высоких частотах для определения проницаемости и тангенса угла потерь\*. Согласно нормативным документам на высокочастотные материалы (магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа и ферриты) испытания производят на кольцевых образцах определенных размеров. Однако свойства образцов, изготовленных из одинаковых материалов и по одной технологии, в значительной мере зависят от размеров и формы образцов. В связи с этим на заводах-изготовителях контролируют не материалы, а фактически изделия из них; измерительную аппаратуру и методику выбирают в зависимости от марки материала сердечника, его формы и размеров, после чего устанавливают соответствующие магнитные характеристики и условия испытания (частоту, напряженность поля и т. д.). При массовом контроле однотипной продукции в одинаковых условиях целесообразно применять автоматы высокой производительности для разбраковки изделий.

Для измерения потерь в широком диапазоне частот и магнитных индукций может быть также использован калориметрический метод (абсолютный или дифференциальный) [27—30]. Благодаря высокой точности [погрешности измерений не превышают  $\pm (2-3)\%$ ] этот метод применяют как контрольный при проверке результатов измерений другими методами. Он позволяет определять потери и при сложном намагничивании (постоянным и переменным полями, полями двух частот, импульсными полями и т. п.). Основным недостатком этого метода является длительность измерения. Однако при автоматизации процесса уравнивания измеряемой мощности мощностью постоянного тока дифференциальный калориметрический метод дает возможность значительно сократить время на измерение потерь.

### Выводы

Для оценки качества высокочастотных ферромагнитных материалов при намагничивании переменным периодическим полем сверхзвуковых частот (до 1 МГц), получения справочных характеристик материала и других целей можно рекомендовать разработку и производство следующей аппаратуры.

#### 1. Приборы непосредственной оценки:

а) вольтметры и милливольтметры действующих, средних и амплитудных значений класса точности  $\leq 1$  с пределами измерений напряжения 10 мВ—300 В на частоте до 1 МГц;

\* Методика и аппаратура описаны на стр. 45—55.

б) амперметры и миллиамперметры (желательно многопредельные) класса точности 0,5—1 с пределами измерений тока 1 ма—1 а в том же диапазоне частот;

в) ваттметры и милливольтметры малокосинусные ( $\cos \varphi = 0,05 \pm 0,1$ ) класса точности 1—1,5 при  $f < 100$  кГц и класса точности  $\leq 2,5$  — при  $f < 1$  МГц.

2. Аппаратура для определения магнитной проницаемости и тангенса угла потерь (желательно при одновитковом намагничивании) — мосты, например по схеме Максвелла—Вина и резонансной схеме, для измерения индуктивности и сопротивления в диапазоне частот соответственно 1—100 и 10—1000 кГц и в диапазоне напряженностей поля 0,1—100 а/м с погрешностями измерений не выше соответственно  $\pm 1$  и  $\pm 5\%$ .

3. Аппаратура для определения коэффициентов потерь:

а) мосты для измерения индуктивности и сопротивления в диапазоне частот 10 кГц—1 МГц и напряженностей поля 1—100 а/м с погрешностями измерений не выше соответственно  $\pm 0,5$  и  $\pm 1\%$ , применяемые для определения коэффициентов потерь на гистерезис и вихревые токи с погрешностью порядка 10%;

б) мосты по схеме Вильде для измерения взаимной индуктивности и тангенса угла потерь, применяемые для определения коэффициентов дополнительных потерь с погрешностью порядка  $\pm 10\%$ .

4. Аппаратура для определения температурных коэффициентов магнитной проницаемости и тангенса угла потерь:

а) аппаратура с нижним пределом измерений температурных коэффициентов магнитной проницаемости порядка  $1 \cdot 10^{-5}$  град<sup>-1</sup> в диапазоне температур  $(-70) \div (+150)^\circ \text{C}$  с погрешностью  $\pm (10 \div 20)\%$ ;

б) термокриостаты (на несколько образцов), применяемые совместно с установками, измеряющими индуктивность и сопротивление, в том же диапазоне температур.

5. Образцовые меры и приборы, а также вспомогательная аппаратура для измерительных установок:

а) катушки индуктивности с пределами  $L = 10^{-2} \div 10^{-1}$  гн и  $r = 10^{-2} \div 10^2$  ом при  $f = 1$  кГц  $\div 1$  МГц с погрешностями их аттестации не выше соответственно  $\pm 0,1$  и  $\pm (0,3 \div 3)\%$  в зависимости от значения  $r$ ;

б) магазины емкости класса точности 0,05—0,1 (с воздушным и твердым диэлектриком) с пределами  $C = 50$  пф  $\div 1$  мкф и  $\text{tg } \delta = 2 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^{-3}$  на частоте до 1 МГц.

в) магазины сопротивления (или проводимости) класса точности 0,1—0,5 с пределами  $r = 10^{-3} \div 10^4$  ом при изменении начальной индуктивности  $\Delta L_0 \leq 0,1$  мкн ( $\leq 100$  ом) на частоте до 1 МГц;

г) генераторы с усилителями мощности (выходная мощность 5—10 вт) для фиксированных частот  $f = 1$  кГц  $\div 1$  МГц со стабильностью по частоте не ниже 0,05%, с содержанием высших гармоник в кривой выходного напряжения не выше 1%, нагрузкой на выходе 3—300 ом;

д) указатели равновесия в диапазоне частот 10 кГц—1 МГц с порогом чувствительности  $\leq 1$  мкв;

е) разделительные трансформаторы для сверхзвуковых частот;

ж) активные и реактивные плечи отношений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Magnetic Bridge. «Rev. sci. instrum.», 1955, v. 26, № 8.
2. Dieterly D. C. and Ward C. E. A wide-range A—C Bridge Test for Magnetic Materials. «ASTM Bulletin», 1952, № 182, p. 75.
3. Л и н ч А. Мостовые методы измерения параметров магнитных материалов на частотах, применяемых в технике связи. Сб. «Точные электрические измерения». Под ред. Колян Я. Н. М., ИЛ, 1959.

4. Sinclair D. A Radio-Frequency Bridge for Impedance Measurement from 400 Kilocycles to 60 Megacycles. «Proc. IRE», 1940, № 11.
5. Смирнова Л. Г. Поведение некоторых ферромагнитных материалов в слабых магнитных полях повышенной частоты ( $10^6-10^7$  гц). «Труды ЦНИИЧЕРМЕТ», вып. 23. М., Металлургиздат, 1960.
6. Kirke H. L. Radio-Frequency Bridges. «J. of IEE», 1945, v. 92, № 17.
7. Tuffe W. Bridged-T and parallel-T null circuits for measurement at radio frequencies. «Proc. IRE», 1940, v. 28.
8. Sinclair D. B. A twin-T new type of null instrument for measuring impedance at frequencies up to 30 Megacycles. «Proc. IRE», 1940, v. 28.
9. Карпенко В. П. Возможности применения Т-образных схем для магнитных измерений. «Вопросы магнитных измерений». Сб. трудов Института электромеханики АН УССР. Киев, Изд. АН УССР, 1959.
10. Hague V. Alternating Current Bridge Methods. Pitman and Sons. London, 1959, Edit. 5.
11. Грохольский А. Л. Измеритель проводимости в диапазоне частот 1—250 Мгц по двойной Т-образной схеме. «Труды Конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений». Новосибирск, Изд. СО АН СССР, 1959.
12. Грохольский А. Л. и Мельников А. Н. Измерение добротности катушек с помощью двойных Т-образных схем. Доклады Научно-технической конференции по измерительной технике. Новосибирск, Изд. СО АН СССР, 1961.
13. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М., Физматгиз, 1960.
14. Welsby V. G. The measurement of the loss coefficients of magnetic dust core materials. Post office El. Eng., 1942, pt. 2.
15. Blechschmidt E. Präzisionsmessungen von Kapazitäten, Induktivitäten und Zeitkonstanten Friedr. Vieweg und Sohn. Braunschweig, 1957, № 14.
16. Oddie T. H. Magnetic measurement of Iron Powders. «J. sci. instrum.», 1944, v. 21, № 9.
17. Чернышева Н. Г. Уставка для испытания образцов ферромагнитных материалов в диапазоне частот 20 кгц — 1 Мгц. «Труды институтов Комитета», вып. 43 (103). М.—Л., Стандартгиз, 1960.
18. Wilde H. Die Vorteile die Gegeninduktivitätsmessbrücke bei ferromagnetischen Messungen. Mitteilung aus dem Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Stuttgart AEU, 1952, № 6.
19. Зорин Д. И., Иванова Л. Ф., Чернышева Н. Г., Шрамков Е. Г. Резонансный мост для определения магнитных характеристик высокочастотных магнитно-мягких материалов. «Труды институтов Госкомитета», вып. 79 (139). М.—Л., Стандартгиз, 1965.
20. Зорин Д. И., Иванова Л. Ф., Чернышева Н. Г. Измерительная установка по схеме переменного тока со взаимной индуктивностью для определения проницаемости и коэффициентов потерь. «Труды институтов Госкомитета», вып. 79 (139). М.—Л., Стандартгиз, 1965.
21. Rasmussen A. L., Powell R. C. A low-impedance Maxwell bridge for measuring toroidal magnetic materials from 1 кс to 100 кс. «Proc. IRE», 1962, v. 50, № 12.
22. Rasmussen A. L. and Hess A. E. R-F Permeameter Techniques for Testing Ferrite Cores. «J. Electrical Manufacturing», 1958, v. 61, № 5.
23. Hoer C. A. and Rasmussen A. L. Exact equation for the radiofrequency magnetic permeameter. J. of Res. of NBS Engineering and Instrumentation, 1963, v. 67C, № 1.
24. Mulhall V. E. The measurement of magnetic permeability at radio frequencies. «Philips Res. Repts», 1964, № 19.
25. Грохольский А. Л. Измеритель магнитных характеристик материалов в диапазоне частот 10 кгц — 20 Мгц с коаксиальным держателем. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
26. Van der Burgt C. M., Gevers M. and Wijn H. P. J. «Philips Techn. Rev.», 1953, № 14.
27. Орлова И. А., Чернышев Е. Т. Определение полных потерь в образцах ферромагнитных материалов калориметрическим методом. «Труды институтов Комитета», вып. 43 (103). М.—Л., Стандартгиз, 1960.
28. Карпенко В. П. Калориметрический метод измерения потерь в ферромагнитных материалах. «Вопросы магнитных измерений». Сб. трудов Института электротехники АН УССР. Киев, Изд. АН УССР, 1959.
29. Карпенко В. П. О применении дифференциального калориметра в магнитных измерениях. «Измерительная техника», 1960, № 8.
30. Хусейн Нигм. Разработка калориметрической установки с адиабатической оболочкой для измерения магнитных потерь и исследование погрешностей измерения потерь мостовым, потенциометрическим и ваттметровым методами. Автореферат диссертации. МЭИ, 1964.



## ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ЧАСТОТОЙ ВЫШЕ 1 МГц

### Параметры, определяющие поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях

Одним из основных параметров, определяющих поведение ферромагнетиков в переменных магнитных полях, является комплексная магнитная проницаемость  $\bar{\mu} = \mu_1 + j\mu_2$ . Составляющие проницаемости  $\mu_1$  и  $\mu_2$  имеют сложную частотную зависимость, определение которой необходимо во многих случаях, особенно при разработке и исследовании новых высокочастотных (ВЧ) магнитных материалов.

Измерение  $\bar{\mu}$  сводится в большинстве случаев к измерению активной и реактивной составляющих полного сопротивления контуров определенной формы (намотка на образец, рамка, ВЧ-пермеаметр, коаксиальная линия и т. д.) с испытуемым материалом.

В настоящее время еще не разработан единый метод определения параметров магнитных материалов, пригодный для всего применяемого в технике диапазона частот (от десятков герц до сотен и тысяч мегагерц). Поэтому на различных частотах используют различные измерительные устройства. Для звуковых и повышенных частот наиболее удобными и точными являются мостовые схемы; для высоких частот — резонансные и мостовые; метровых, дециметровых и сантиметровых волн — системы с распределенными постоянными (коаксиальные линии и волноводы).

Существенным условием правильности измерений является однородность магнитного поля в образце, поэтому испытывают обычно кольцевые образцы.

Более удобен по сравнению с рамкой или вспомогательной обмоткой отрезок коаксиальной линии — коаксиальный держатель, в который помещают при измерении испытуемый образец. Это дает возможность сократить время на подготовку к испытанию, упрощает расчетные формулы и увеличивает их точность.

Расчетные формулы для данного случая могут быть получены из формулы входного сопротивления короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии с испытуемым образцом [1]

$$Z_{кз} = Z_0 \operatorname{th} \gamma_n d,$$

где  $Z_0$  — волновое сопротивление указанного отрезка линии;  
 $\gamma_n$  — постоянная распространения;  
 $d$  — толщина образца.

Необходимо отметить, что большая часть высокочастотных ферромагнетиков имеет сравнительно малые потери. Учитывая, что длина образца значительно меньше длины волны  $\lambda$  [2], получим:

$$\mu_1 = \frac{X_{кз}}{Z_0 \beta_0 d};$$

$$\mu_2 = \frac{R_{кз}}{Z_0 \beta_0 d};$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{R_{кз}}{X_{кз}},$$

где  $R_{кз}$  и  $X_{кз}$  — активная и реактивная составляющие входного сопротивления короткозамкнутого отрезка коаксиальной линии с испытуемым образцом;

$Z_0$  — волновое сопротивление линии;

$\beta_0$  — фазовая постоянная, равная  $\frac{2\pi}{\lambda}$ .

Последние выражения в общем случае позволяют определить комплексную магнитную проницаемость. Однако в зависимости от диапазона частот и прибора, на котором производят измерение, окончательные расчетные формулы для  $\mu$  могут принимать и иной вид [3, 4].

#### Цепи с сосредоточенными параметрами для исследования ферромагнетиков

Анализ методов и аппаратуры для измерения комплексной магнитной проницаемости ферромагнетиков в широком диапазоне частот показал следующее.

В настоящее время успешно используется ряд установок на частотах до 1 Мгц [3, 5—7]. На частотах же 150—200 Мгц и выше для измерения параметров ферромагнетиков (особенно с большими потерями) широко применяют различные типы измерительных линий. Этому способствует теория измерения параметров магнитных материалов (по данным двух измерений) К. М. Поливанова [8].

Менее благополучно обстоит дело в отношении диапазона частот 1—200 Мгц. До сих пор еще не разработана единая методика измерения. При испытании одного и того же материала на различных предприятиях часто не обеспечивается повторяемость результатов измерений, расхождение достигает иногда 50% и более. Правда, этот диапазон имеет специфические особенности: он является переходным, потому что цепи с сосредоточенными параметрами на верхнем его участке дают большие трудно учитываемые погрешности за счет влияния паразитных параметров (межвитковых емкостей катушек индуктивности, распределенной индуктивности, сопротивления конденсаторов переменной емкости и т. д.); цепи же с распределенными параметрами на нижнем участке практически неприемлемы вследствие больших их размеров.

Устройства для включения испытуемого образца в измерительную цепь. При измерении магнитных материалов на сравнительно низких частотах (ниже 10 Мгц) чаще всего используют тороидальный образец прямоугольного сечения с равномерной однослойной обмоткой [9] или одновитковой рамкой [10].

С возрастанием частоты резко увеличивается погрешность за счет влияния распределенной межвитковой емкости, емкости между обмоткой и сердечником, сопротивления провода, индуктивности рассеяния и т. д. Учет

влияния этих погрешностей сложен и неточен. Кроме того, нанесение обмотки на каждый образец — весьма трудоемкая операция.

Более совершенен по сравнению с методом рамки или однослойной обмотки ВЧ-пермеаметр [11]. В данном случае на испытуемый кольцевой образец из материала с малыми потерями не наносят вспомогательную обмотку, что позволяет избежать ряда ошибок. В качестве вторичной обмотки используют закороченный на конце 1 (рис. 1) отрезок коаксиальной линии 2, куда помещают при измерении испытуемый образец 5. Первичная обмотка наносится на образец 3. Выводы обмотки крепят к зажимам 4.

Препятствием к широкому применению пермеаметров длительное время оставалось низкое качество приборов для измерения добротности (куметров). Серийные куметры КВ-1 и УК-1 измеряли лишь сравнительно большие значения добротности — не менее 50 (КВ-1) и 100 (УК-1) единиц [12]. Внедрение вновь разработанных нашей промышленностью куметров Е9-4 и Е9-5 должно изменить это положение. Более высокие точность и чувствительность этих приборов позволят расширить пределы измерения характеристик ферромагнетиков (особенно материалов с малыми потерями) и повысят надежность результатов.

Широкому внедрению пермеаметров должна способствовать также и более совершенная методика их аттестации. В этом случае, кроме входного сопротивления пермеаметра с разомкнутой, замкнутой вторичной обмоткой и замкнутой вторичной обмоткой с помещенным в нее испытуемым образцом, дополнительно измеряют образец с известными характеристиками. Таким образом сравнивают параметры исследуемого и нормального образцов. При расчете постоянные пермеаметра исключают или определяют их для каждого конкретного прибора [13]. Существенным недостатком по-прежнему остаются громоздкие расчетные формулы. Однако при некоторых допущениях они могут быть заменены графиками без большей дополнительной погрешности.

Для примера на рис. 2 приведены графики (для набора ВЧ-пермеаметров, частота 1 МГц), позволяющие определить угол потерь  $\operatorname{tg} \delta$  (рис. 2, а) и магнитную проницаемость  $\mu_1$  (рис. 2, б) по измеренным на куметре емкости  $C$  и добротности  $Q$  ВЧ-пермеаметра с испытуемым образцом. Аналогичные графики можно построить для различных частот и размеров образцов.

ВЧ-пермеаметры могут быть использованы на частотах до 40—50 МГц [14]. На более высоких частотах пермеаметр превращается в отрезок закороченной на конце коаксиальной линии [15, 16], по величине полного сопротивления которого определяют характеристики образца. Однако при этом большую погрешность в результат измерения вносят остаточные параметры измерительного контура [17], учет влияния которых сложен и неточен.

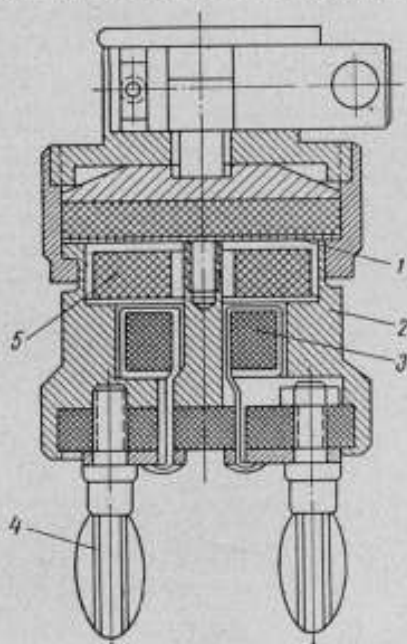


Рис. 1. Схема высокочастотного пермеаметра.

Более совершенно в этом отношении измерение магнитной проницаемости и угла потерь посредством дополнительного контура, подключенного параллельно измерительному [18]. Дополнительный контур состоит из конденсатора переменной емкости и закороченного на конце отрезка коаксиальной линии переменной длины, которые конструктивно объединены в компенсационный держатель образцов (рис. 3). В данном случае в измерительный контур вносится только активное сопротивление, определяемое потерями держателя и исследуемого образца. Вещественную составляющую магнитной проницаемости определяют изменением длины коаксиальной линии компенсационного держателя.

Таким образом, из перечисленных устройств наиболее удобными являются ВЧ-пермеаметр и компенсационный держатель, благодаря кото-

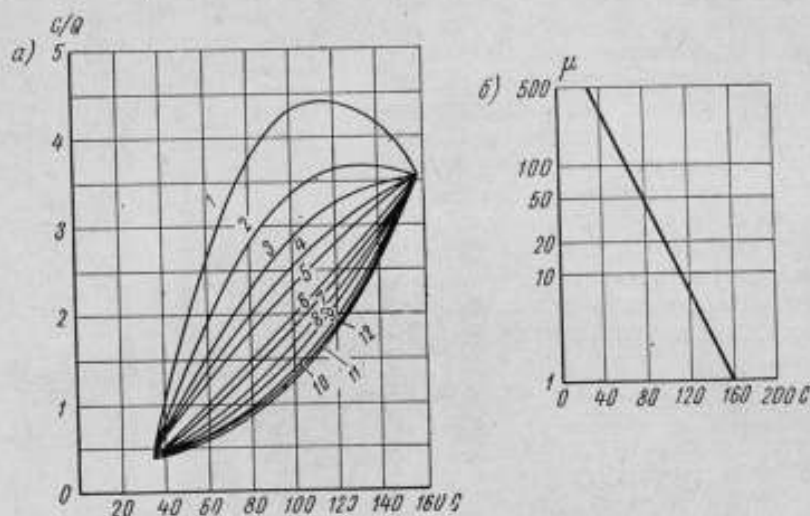


Рис. 2. Графики для определения угла потерь (а) и магнитной проницаемости (б):  
 кривая 1 —  $\text{tg } \delta = 0,09$ ; кривая 2 —  $\text{tg } \delta = 0,07$ ; кривая 3 —  $\text{tg } \delta = 0,05$ ; кривая 4 —  $\text{tg } \delta = 0,04$ ;  
 кривая 5 —  $\text{tg } \delta = 0,03$ ; кривая 6 —  $\text{tg } \delta = 0,025$ ; кривая 7 —  $\text{tg } \delta = 0,02$ ; кривая 8 —  $\text{tg } \delta =$   
 $= 0,015$ ; кривая 9 —  $\text{tg } \delta = 0,10$ ; кривая 10 —  $\text{tg } \delta = 0,005$ ; кривая 11 —  $\text{tg } \delta = 0,002$ ; кривая 12 —  
 $\text{tg } \delta = 0$ .

рым значительно расширен диапазон частот для измерений — от сотен килогерц до 200—300 Мгц. Каждый из них может быть использован в сочетании с куметрами, приборами для измерения полной проводимости, полного сопротивления и другими в указанном диапазоне частот. Погрешности пермеаметра и держателя определяются погрешностями градуировки (пермеаметра) и измерительного прибора, используемого для определения их входного сопротивления.

Так, например, погрешность измерения магнитной проницаемости на куметрах Е9-4 и Е9-5 для большинства высокочастотных ферромагнетиков составляет  $\pm (5 \div 10)\%$ , а угла потерь  $\pm (10 \div 25)\%$ . При необходимости более точного определения этих величин в результаты измерения, полученные на куметре, следует внести поправку на влияние остаточных параметров [19].

Все перечисленные выше устройства не имеют специальных приспособлений для измерения напряженности поля, что часто является причиной расхождения результатов, особенно в том случае, если входное сопротивление определяют различными измерительными устройствами. Малая напряженность поля, высокие частоты и малый объем устройства,

в которое помещают образец, требуют особой методики измерения напряженности поля. Обычные низкочастотные методы [6] не могут быть применены в данном случае.

Разработанный в НГИМИП метод измерения заключается в сравнении образцового поля соленоида, градуированного на постоянном токе, с измеряемым полем высокочастотного одноконтурного пермеаметра или компенсационного держателя [20]. Сравнение производят специальным зондом,

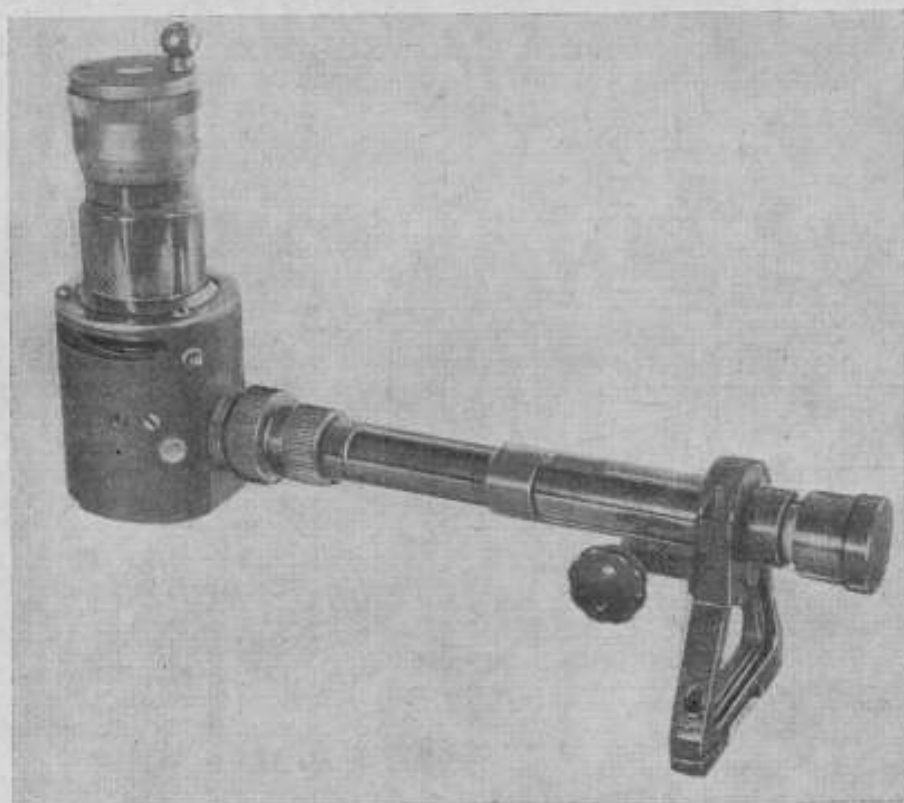


Рис. 3. Компенсационный держатель образцов.

представляющим собой катушку с малым числом витков; зонд соединен с измерительным приемником (например, ИП-14). Преимущество этого метода — в его простоте, а также в отсутствии погрешности за счет измерительного прибора, поскольку измерения производят, по существу, нулевым методом.

**Мостовые цепи.** Определение комплексной магнитной проницаемости ферромагнетиков на высоких частотах в большинстве случаев связано с измерением малых значений индуктивности и активного сопротивления. Серийные приборы для измерения полного сопротивления (особенно в диапазоне частот до 40—50 Мгц), как правило, не позволяют определять малые полные сопротивления. Отдельные приборы, например Е10-4 [СССР; пределы измерения активной составляющей 0—200 ом, реактивной  $0 \div (\pm \frac{200}{0,01f})$  ом, диапазон частот 20—150 Мгц], 916-А и 1606-А (США, фирма «Дженерал радио», пределы измерения активной составляющей 0—1000 ом, реактивной — соответственно  $\pm 1100$  пф на 100 кгц и  $\pm 5000$  пф на 1 Мгц;

диапазоны частот 0,05—5 и 0,04—60 МГц) можно использовать только для качественного контроля характеристик магнитных материалов. Однако характеристики материалов с малыми потерями ( $\operatorname{tg} \delta < 0,1$ ) не удается измерять непосредственно, поскольку их полное сопротивление мало. Поэтому возникает необходимость искусственного увеличения сопротивления посредством вспомогательной обмотки, отрезка коаксиальной линии достаточно большой длины или ВЧ-пермеметра. Это характерно для отечественных и зарубежных приборов, применяемых в диапазоне частот до 40—50 МГц [3, 9, 21—23].

Сказанное выше относится и к двойным Т-образным схемам. Трансформирующим элементом здесь является отрезок закороченной на конце коаксиальной линии [2].

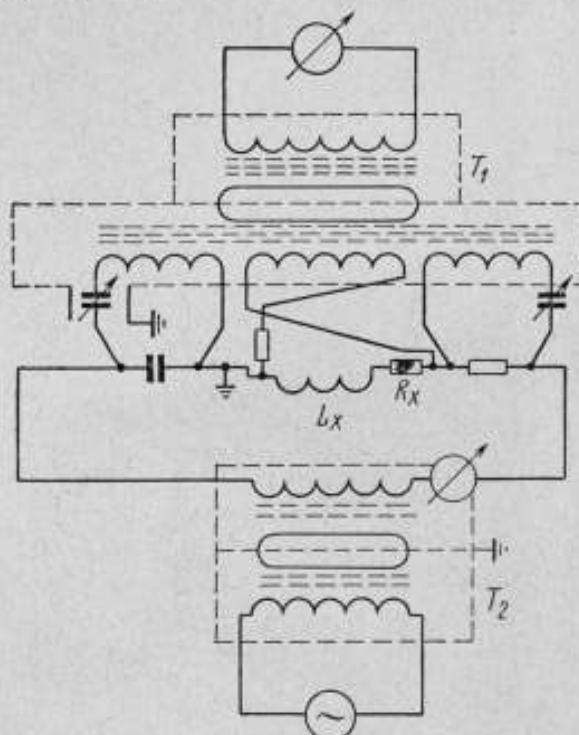


Рис. 4. Принципиальная схема трансформаторного моста.

$T_1$  и  $T_2$  — выходной и входной трансформаторы;  $L_x$  — измеряемая индуктивность;  $R_x$  — активное сопротивление.

тационными свойствам эти мосты широко применяют при измерении полных сопротивлений, емкостей, индуктивностей и др. [24].

Целесообразность применения трансформаторных мостов для точного измерения малых активных и индуктивных сопротивлений в широком диапазоне частот доказана в работе [25]. Там же говорится о перспективности использования приборов, измеряющих малые полные сопротивления, при безобмоточных испытаниях ферромагнитных материалов. На рис. 4 приведена схема моста для измерения индуктивности  $10^{-8}$ — $750 \cdot 10^{-9}$  гн и сопротивления 0,001—0,3 ома в диапазоне частот 10 кГц—1,5 МГц.

**Резонансные цепи.** Параметры ферромагнетиков на высоких частотах определяют чаще всего посредством резонансных цепей. Последние раз-

личаются высокой точностью, что позволяет создавать на их основе образцовое оборудование, а также широким диапазоном частот [23]. Так, например, с помощью прибора для измерения полной проводимости ИПП-2, собранного по двойной Т-образной схеме, определяют ее активную и реактивную составляющие на частотах до 250 МГц с погрешностью  $\pm (0,5+1,0)\%$ .

Весьма ценно было бы создать прибор для непосредственного измерения малых приращений полного сопротивления, обусловленных испытуемым образцом. В некоторых случаях это упростит процесс измерения, а также расчетные формулы.

Особое место занимают схемы трансформаторных измерительных мостов. Благодаря высоким метрологическим и эксплуатационным

личаются методами определения активной составляющей полного сопротивления, заключающимися в измерении:

- а) изменения сопротивления;
- б) изменения проводимости (в этих случаях отсчеты по ламповому вольтметру с отключенным и присоединенным образцом поддерживают одинаковыми, вводя соответствующие сопротивления последовательно или параллельно с образцовым конденсатором);
- в) изменения реактивной проводимости;
- г) ширины резонансной кривой, полученной при изменении частоты;
- д) возрастания напряжения резонанса (напряжение, вводимое в контур через соответствующую последовательную его часть, сравнивают с резонансным).

Неплохие результаты при испытании показал прибор, в основу которого положен метод определения изменения сопротивления [26]. При этом реактивная составляющая замещается переменной емкостью, активная — образцовым диодным сопротивлением [24].

Наиболее распространен в практике метод возрастания резонансного напряжения, положенный в основу куметра.

#### Цепи с распределенными параметрами для исследования ферромагнетиков

Комплексная магнитная проницаемость на частотах 100—200 *Мгц* и выше может быть определена с помощью цепей с распределенными параметрами. Однако применяемая обычно при измерении характеристик магнитных материалов с малыми потерями измерительная линия [16] пригодна только для качественной оценки свойств ферромагнетиков. Для повышения точности пользуются, как правило, вспомогательным отрезком коаксиальной линии, трансформирующим полное сопротивление испытуемого образца до величины, которую можно определить посредством измерительной линии [27]. Можно использовать для этой цели также коаксиальные резонаторы, в литературе описано большое число различных их конструкций.

На частоте 100 *Мгц* и менее применяют резонаторы, нагруженные на емкость [28]. В данном случае магнитную проницаемость и потери материала определяют, измеряя емкость и добротность резонатора с испытуемым образцом и без него. Недостатком таких резонаторов является то, что изменение емкости конденсатора вносит значительные погрешности в результат измерения за счет влияния краевой емкости, изменения распределенной индуктивности конденсатора и пр.

Более удобен (правда, только в области частот 200 *Мгц* и выше) для измерения характеристик магнитных материалов открытый на конце резонатор [29]. Однако для частот ниже 200 *Мгц* он будет громоздким. Недостатком этих резонаторов является то, что они имеют либо большие погрешности измерения [более  $\pm (25-30) \%$  для угла потерь] и требуют введения сложных поправок в результаты, либо малый диапазон частот и позволяют определять параметры материалов только с малыми потерями. Материалы с большими потерями, как уже говорилось, определяют посредством измерительной линии [16].

Представляет интерес идея создания метода измерения, основанного на одновременном использовании измерительной линии и резонатора [30]. Весьма перспективно применение коаксиального резонатора с двумя подвижными закорачивающими поршнями для определения параметров ферромагнетиков с малыми и большими потерями [31]. С помощью этого резонатора (рис. 5) можно измерять комплексную магнитную и диэлек-

трическую проницаемость материалов. При отсутствии воздушных зазоров между поверхностью образца и линией погрешности измерений магнитной  $\mu_1$  и диэлектрической  $\epsilon_1$  проницаемости составляют  $\pm (3-10)\%$  при  $\mu_1 = \epsilon_1 = 2-100$ , угла потерь  $\pm (10-30)\%$  при  $\text{tg } \delta_{\mu_1} = \text{tg } \delta_{\epsilon_1} = 0,001-2$ . Несмотря на трудности изготовления закорачивающих порш-

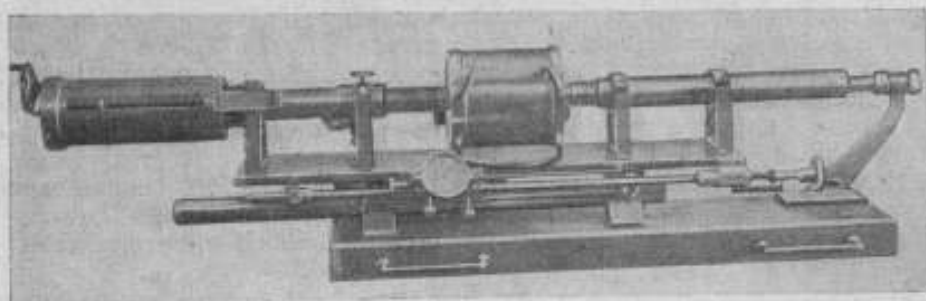


Рис. 5. Резонатор переменной длины.

ней с достаточно высоким коэффициентом стоячей волны положительным для резонатора такого вида является широкий диапазон частот и измеряемых величин, отсутствие влияния остаточных параметров и диэлектрических опор.

При определении параметров ферромагнетиков в данном случае также необходимо знать напряженность магнитного поля в месте расположения

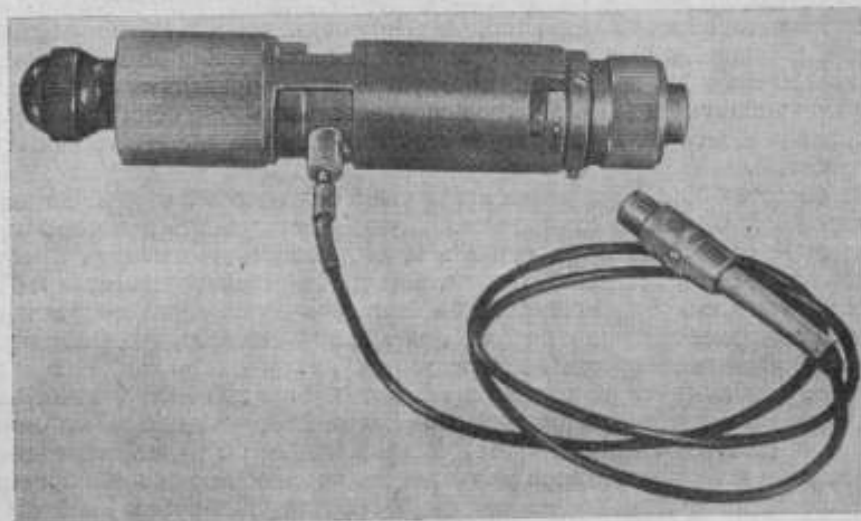


Рис. 6. Индукционный зонд.

образца. В короткозамкнутой коаксиальной линии автор измерял ее специальным зондом (рис. 6). Зонд представляет собой петлю с дополнительным компенсирующим элементом — скобой, частично охватывающей петлю. Скоба действовала как электростатический экран. Измерения производились путем сравнения поля резонатора с известным полем. Принятая методика позволила исключить влияние параметров цепи зонда на



точность измерения. Наибольшая напряженность поля вдоль коаксиальной линии (источник питания — генератор Г4-31) не превышала 4 а/м; напряженность вдоль радиуса изменялась в 2,4 раза.

### Исследование магнитных характеристик при различных температурах

Магнитные характеристики материалов при различных температурах измеряют в большинстве случаев с помощью термостата, в который помещают испытуемый образец и вспомогательное устройство для его подключения (например, обмотка) к измерительной цепи.

При измерении различного вида резонаторами последние также помещают в термостат и нагревают вместе с образцом [32]. Этот способ широко распространен, так как не требует специальных термокамер и позволяет ограничиться обычными лабораторными печами. Однако он имеет следующие недостатки:

1. Применение обмотки на частотах выше 5—10 Мгц не рационально, так как межвитковая емкость, емкость между обмоткой и образцом, сопротивление последней и индуктивность соединительных проводов вызывают большие трудно учитываемые погрешности.

2. Нагревание резонатора значительной массы, а затем охлаждение его до нормальной температуры, при которой возможна установка или замена образцов, требуют продолжительного времени, большого расхода электрической энергии и значительных габаритов термостата.

Устройства, разработанные в Новосибирском государственном институте мер и измерительных приборов (НГИМИП), не имеют этих недостатков. На частотах до 50 Мгц исследование температурных зависимостей ферромагнетиков удобно производить с помощью пермеаметра совместно с куметром Е9-4 или Е9-5. Такого рода пермеаметры снабжены нагревателем и холодильником, системой термостатирования корпуса и внутреннего стержня пермеаметра. Термостатирование осуществляется водой, протекающей по канавкам в корпусе пермеаметра.

На частотах выше 50 Мгц необходимо применять специальные устройства. Разработанные в НГИМИП термокамеры [33] вместе с коаксиальными резонаторами позволяют исследовать изменение электромагнитных характеристик ферромагнетиков при температуре 93,15—1073,15° К на частотах выше 200 Мгц. На частотах 50—200 Мгц термокамеры можно использовать с компенсационным держателем [18], одноконтурным пермеаметром или закороченным на конце отрезком линии, подключенным к какому-либо измерительному прибору [2]. Режимы работы термокамер устанавливает и поддерживает автоматический блок. Запись производит электронный потенциометр ЭПП-09.

Разработано несколько конструкций термокамер: с охлаждением углекислотой, с охлаждением жидким азотом и для повышенных температур.

### Выводы

Описанные выше аппаратура и методы позволяют исследовать характеристики большинства высокочастотных ферромагнетиков. На частоте выше 1 Мгц удобнее использовать двух- и одноконтурные пермеаметры и компенсационный держатель в сочетании с куметрами и приборами для измерения полных сопротивлений и проводимостей. Такого рода устройства можно применять и при массовых испытаниях, заменяя в некоторых

случаях расчетные формулы графиками. Методы измерения следует проверять на образцах с известными параметрами (нормальных образцах), аттестацию которых необходимо производить с помощью мостовых установок, собранных по одинарной или двойной Т-образной схеме.

В дальнейшем одновременно с улучшением качества серийно выпускаемых измерителей добротности, измерителей полных проводимостей и сопротивлений целесообразно создать приборы для измерения малых полных сопротивлений, которые позволят определять (в том числе на частотах 1—50 МГц) активную составляющую полного сопротивления  $1 \cdot 10^{-8}$  ома и менее, а также индуктивность  $1 \cdot 10^{-9}$  гн и менее.

Наиболее перспективны в этом отношении трансформаторные мосты или, как их часто называют, мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами [34]. Существуют различные схемы этих мостов, которые широко применяют в диапазоне частот от нескольких герц до нескольких сотен мегагерц. В результате анализа установлены условия получения повышенной чувствительности трансформаторных мостов, превосходящей в десятки и сотни раз чувствительность обычных мостовых схем [35].

Для исследования параметров ферромагнетиков следует разрабатывать трансформаторные мосты с емкостными образцовыми мерами для определения реактивной и активной составляющих полного сопротивления образца. Это даст возможность отказаться от образцового переменного активного сопротивления, разработка и изготовление которого для высоких частот — задача далеко не решенная. Возможно, что мосты такого типа (вместе с одинарными и двойными Т-образными мостами) найдут применение для аттестации нормальных образцов, а также в ряде автоматических быстродействующих установок [36].

Надо полагать, что при массовых испытаниях магнитных материалов найдут широкое применение автоматические установки, в основе которых лежат схемы трансформаторных мостов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хиппель А. Диэлектрики и их применение. М.—Л., ГЭИ, 1959.
2. Кугаевский А. Ф. Определение комплексной проницаемости ферритов в диапазоне метровых волн. «Измерительная техника», 1962, № 2.
3. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М., Физматгиз, 1960.
4. Грохольский А. Л., Кугаевский А. Ф. Набор высокочастотных пермеаметров для определения магнитной проницаемости и угла потерь ферромагнитных материалов. «Измерительная техника» 1963, № 7.
5. Рабкин Л. И., Соскин С. А., Эпштейн В. Ш. Технология ферритов. М.—Л., ГЭИ, 1962.
6. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М., ГЭИ, 1962.
7. Зорин Д. И., Иванова Л. Ф., Чернышева Н. Г., Шрамков Е. Г. Резонансный мост для определения магнитных характеристик высокочастотных магнитных материалов. «Труды институтов Госкомитета», вып. 79 (139). М.—Л., Изд. стандартов, 1965.
8. Поливанов К. М. К теории определения проницаемости металлических ферромагнетиков и магнитодиэлектриков по данным опытов. «Электричество», 1954, № 3.
9. Рабкин Л. И., Шольц Н. Н. Магнитодиэлектрики и ферро катушки. М.—Л., ГЭИ, 1948.
10. Грохольский А. Л., Кугаевский А. Ф. Расширение частотного предела применимости высокочастотных пермеаметров. «Труды институтов Комитета», вып. 72 (132). М.—Л., Стандартгиз, 1963.
11. Грохольский А. Л., Кугаевский А. Ф. Определение магнитной проницаемости и угла потерь ферромагнетиков куметром. «Заводская лаборатория», 1963, № 9.
12. Шкурин Г. П. Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам. М., Воениздат, 1965, стр. 791.
13. Ноет С. А., Расмуссен А. L. Equations for the Radio Frequency Magnetic Permeameter. «J. of Research of the NBS», 1963, v. 67, № 1.

14. Haas P. H. A Radio-Frequency Permeameter. «J. of Research of the NBS», 1957, v. 51, № 5.
15. Bady I., Franklin R. J. Measurement of permeability and Q of magnetic materials over the Frequency Range of 50 to 500 Mc/s. IRE National convention Record, 1957, v. 5, p. 5.
16. Коллн Я. Н. Применение коаксиальной линии к измерению магнитной и диэлектрической проницаемостей. «Известия высших учебных заведений», радиотехника, 1959, № 6.
17. Грохольский А. Л. Исключение погрешности измерителя добротности типа KB-1. «Измерительная техника», 1960, № 9.
18. Кугаевский А. Ф. Измерение комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей материалов на куметре. «Приборы и техника эксперимента», 1962, № 2.
19. Грохольский А. Л. О погрешности измерителей добротности. «Измерительная техника», 1964, № 2.
20. Кугаевский А. Ф., Талько-Грицевич П. П. Измерение напряженности магнитного поля на высоких частотах. «Труды институтов Госкомитета», вып. 79 (139). М.—Л., Стандартгиз, 1965.
21. General Radio Company, Catalog Q, Cambridge, USA, 1961.
22. General Radio Company, Catalog O, Cambridge, USA, 1957.
23. Tuttle W. N. Bridged-T and Parallel-T Null Circuits for measurements of Radio Frequencies. PIRE, 1940, № 1.
24. Эпштейн С. Л. Измерение характеристик конденсаторов. М.—Л., Энергия, 1965.
25. Грохольский А. Л., Кугаевский А. Ф. Устройства для измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов в диапазоне частот 10 кГц — 750 МГц. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
26. Ремез Г. А. Курс основных радиотехнических измерений. М., Связьиздат, 1956.
27. Вайсфлор А. Теория цепей и техника измерений в дециметровом и сантиметровом диапазонах. М., «Советское радио», 1961.
28. Ноер С. А., Harrington R. D. Parallel Reversible Permeability Measurement Techniques from 50 kc/s to 3 Gc/s. Engineering and Instrumentation, 1963, v. 67, № 3.
29. Ван-дер-Бурт К. М. и др. Методы измерения некоторых свойств ферроксидных материалов. Сб. «Проблемы современной физики. Ферромагнетизм». М., ИЛ, 1954.
30. Елькинд А. И. Бесщелевые и измерительные линии. «Измерительная техника», 1960, № 9.
31. Кугаевский А. Ф. Коаксиальный резонатор переменной длины для определения электромагнитных параметров материалов при нормальных и повышенных температурах. «Измерительная техника», 1963, № 11.
32. Жлудько А. Д. Методы измерений температурных зависимостей  $\epsilon$  и  $\operatorname{tg} \delta$  твердых диэлектриков в дециметровом диапазоне радиоволн. «Труды Всесоюзной конференции по физике диэлектриков». М., Изд. АН СССР, 1958.
33. Горбунов Н. В., Кугаевский А. Ф., Петров В. П. Камеры для исследования ферромагнитных материалов при пониженных температурах. «Труды институтов Госкомитета», вып. 79 (139), М.—Л., Изд. стандартов, 1965.
34. Грохольский А. Л., Соболевский К. М. Мосты переменного тока с индуктивно связанными плечевыми элементами. «Автоматриза» (Новосибирск, СО АН СССР), 1965, № 1.
35. Гессен Г. В. О чувствительности некоторых мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. «Труды институтов Комитета», вып. 67 (127). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
36. Карандеев К. Б., Гриневич Ф. Б. О построении автоматических мостов для измерения параметров конденсаторов малой емкости. «Труды II Конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений». Новосибирск, Изд. СО АН СССР, 1962.

### О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЛЕНТОЧНЫХ СЕРДЕЧНИКАХ

При изготовлении витых сердечников из тонкокатаных лент, в частности пермаллоя, бывает необходимо измерять магнитную индукцию непосредственно на сердечниках, а не на контрольных образцах кольцевой формы (тороидах). Сердечники отличаются от контрольных образцов тем, что при их навивке на ленты наносят слой изоляционного покрытия — межвитковой изоляции. В случае измерения магнитных характеристик в переменных полях ленты пермаллоя должны быть покрыты электроизоляционным слоем.

Точность определения магнитной индукции и проницаемости зависит от точности определения магнитного потока и сечения металла образца. Согласно ГОСТ 10160—62 сечение образца вычисляют по формуле

$$S = \frac{P}{\gamma_m \pi D_{\text{ср}}}, \quad (1)$$

где  $P$  — вес образца;

$\gamma_m$  — плотность материала ленты;

$D_{\text{ср}}$  — средний диаметр образца.

Рассчитывая сечение сердечника с межвитковой изоляцией по формуле (1), часто не учитывают вес изоляции, что приводит к ошибке в подсчете индукции. Чем тоньше лента металла, тем меньше коэффициент заполнения  $k_2$  сердечника металлом и тем больше эта ошибка. При толщине ленты 10—20 мкм  $k_2$  понижается до 0,5; в данном случае ошибка может достигать 10%. Если же индукция понизится на 10%, материал может быть забракован.

Сечение металла сердечников с межвитковой изоляцией следует определять по формуле

$$S_m = \frac{P_c - P_{\text{из}}}{\gamma_m \pi D_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $P_c$  и  $P_{\text{из}}$  — соответственно вес сердечника и вес его изоляции.

Однако подсчитывать каждый раз  $P_{\text{из}}$  сложно. Для этого нужно использовать одну из формул:

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{из}} &= 2\delta_{\text{из}} h l_{\text{ср}} \omega \gamma_{\text{из}} \\ P_{\text{из}} &= V_c (1 - k_2) \gamma_{\text{из}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\delta_{из}$  — толщина слоя изоляции;  
 $h$  — ширина ленты;  
 $l_{ср}$  — средняя длина витка;  
 $w$  — число витков ленты в сердечнике;  
 $\gamma_{из}$  — плотность изоляционного слоя;  
 $V_c$  — объем сердечника с изоляцией.

В практике удобнее пользоваться формулой (1) с внесением поправочного коэффициента  $k_n$ , взятого из таблиц или графиков зависимости  $k_n$  от  $k_3$ .

Коэффициент заполнения определяют из отношения сечения металла к сечению сердечника, зависящему от размера последнего:

$$k_3 = \frac{S_m}{S_c},$$

так как

$$k_3 = \frac{V_m}{V_c} = \frac{S_m l_{ср}}{S_c l_{ср}} = \frac{S_m}{S_c};$$

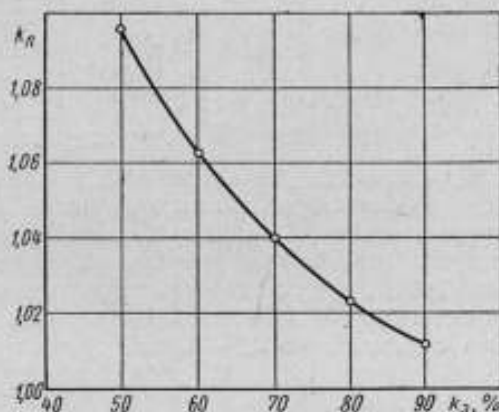
здесь  $V_m$  — объем металла в сердечнике.

Индукция в образце будет

$$B_{обр} = k_n B,$$

где  $B$  — индукция, определенная в зависимости от сечения, рассчитанного по формуле (1).

Поправочный коэффициент равен



Зависимость поправочного коэффициента  $k_n$  от коэффициента заполнения  $k_3$  витого сердечника из лент пермаллоя с электрофорезной магнетальной изоляцией.

$$k_n = \frac{B_{обр}}{B} = \frac{\Phi}{S_m} : \frac{\Phi}{S_c} = \frac{S_c}{S_m} = \frac{P_m + P_{из}}{P_m} = 1 + \frac{P_{из}}{P_m}, \quad (4)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток;

$P_m$  — вес металла.

Вес металла и изоляции может быть выражен равенствами:

$$\left. \begin{aligned} P_m &= V_c k_3 \gamma_m; \\ P_{из} &= V_c (1 - k_3) \gamma_{из}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Подставив в формулу (4) значения  $P_m$  и  $P_{из}$  из (5), получим

$$k_n = 1 + \frac{(1 - k_3) \gamma_{из}}{k_3 \gamma_m}. \quad (6)$$

Если обозначить отношение плотности изоляции  $\gamma_{из}$  к плотности металла  $\gamma_m$  через  $C_\gamma$ , то формула (6) примет вид

$$k_n = 1 - C_\gamma + \frac{C_\gamma}{k_3}. \quad (7)$$

Постоянная  $C_\gamma$  значительно зависит от плотности изоляции и мало зависит от типа пермаллоя.

В производственных условиях удобно пользоваться таблицей заранее подсчитанных поправочных коэффициентов для данной технологии изо-

ляционного покрытия или кривой зависимости  $k_n$  от  $k_s$ . Предварительно должна быть определена лабораторным путем плотность изоляции  $\gamma_{из}$ .

Подставляя в формулу (6) различные значения  $k_s \approx 0,5 \div 0,9$ , получают при постоянной  $C_v$  соответствующие значения  $k_n$ .

$k_s$	$k_n$ железоникелевых сплавов			$k_{n,ср}$	Максимальное отклонение от $k_{n,ср}$
	50НП	65НП	79НМ		
0,5	1,0973	1,0958	1,0930	1,0954	$\pm 0,0024$
0,6	1,0648	1,0638	1,0620	1,0635	0,0015
0,7	1,0413	1,0410	1,0398	1,0407	0,0009
0,8	1,0238	1,0240	1,0238	1,0239	0,0001
0,9	1,0108	1,0106	1,0103	1,0106	0,0003

Для примера приведена таблица, в которой даны поправочные коэффициенты железоникелевых сплавов 50НП, 65НП и 79НМ с плотностью соответственно 8,2; 8,35 и 8,6 г/см<sup>3</sup> для различных  $k_s$  витого сердечника с электрофорезной магниальной изоляцией ( $\gamma_{из} = 0,8$  г/см<sup>3</sup>). Как видно из таблицы, отклонение от среднего значения  $k_{n,ср}$  у каждого материала существенно меньше поправочного коэффициента. Поэтому для пермаллоев с плотностью 8,2—8,6 г/см<sup>3</sup> практически можно пользоваться лишь кривой зависимости  $k_n$  от  $k_s$ , построенной по их средним значениям (см. рисунок).

### О ЧАСТОТНЫХ И ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ИНТЕГРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

При получении квазистатических петель гистерезиса в качестве интегрирующих устройств используют фотокомпенсационные микровеберметры, а для осциллографирования динамических петель перемагничивания — электронные интеграторы.

Для определения диапазона рабочих частот интегратора был исследован спектральный состав входного сигнала при магнитных измерениях в периодически изменяющемся поле. Исследование показало, что ширина спектра э. д. с. на зажимах обмотки измеряемого сердечника при перемагничивании его переменным синусоидальным полем достаточно большой амплитуды  $H_m > 2H_c$  (где  $H_m$  — амплитудное значение напряженности синусоидального поля;  $H_c$  — коэрцитивная сила) зависит от ее амплитудного коэффициента

$$K_a = \frac{E_m}{E} = \sqrt{\frac{3\pi}{\alpha + \beta}}, \quad (1)$$

где  $E_m$  и  $E$  — максимальное и действующее значения э. д. с.;

$\alpha$  и  $\beta$  — соответственно продолжительность нарастания и спада э. д. с., выраженная в угловой мере (рис. 1).

Разложение кривой э. д. с. в ряд показывает, что амплитуды гармоник монотонно убывают с ростом их номеров, причем тем медленнее, чем меньше углы  $\alpha$  и  $\beta$ , т. е. чем больше  $K_a$  [1]. Если допустить, что гармоники с амплитудами, меньшими 10% от основной гармоники, практически не влияют на форму кривой, то при  $K_a = 5$  измерительная аппаратура должна воспроизводить не менее 31 гармоники, а при  $K_a = 10$  — не менее 151. Эти результаты совпадают с экспериментальными. Известно, что при перемагничивании тонкостенного сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ)  $K_a$  будет больше, чем в случае обычного сердечника при прочих равных условиях [2]. Поэтому аппаратура для воспроизведения прямоугольных петель перемагничивания пригодна и для получения петель другой формы.

Амплитудный коэффициент э. д. с. сердечника с ППГ может быть вычислен по формуле

$$K_a = \sqrt{3\pi \frac{H_m}{H_2 - H_1} \cos \left( \arcsin \frac{H_c}{H_m} \right)}, \quad (2)$$

где  $H_1$  — напряженность поля, при которой сердечник начинает перемагничиваться;

$H_2$  — напряженность поля, при которой перемагничивание в основном заканчивается.

Учитывая зависимость характеристик от геометрических размеров кольцевых ферритовых сердечников с ППГ [3], можно определить:

$$K_a = \sqrt{\frac{3\pi}{2} \cdot \frac{H_m}{H_c} \cdot \frac{D+d}{D-d} \cos\left(\arcsin \frac{H_c}{H_m}\right)}, \quad (3)$$

здесь  $D$  и  $d$  — наружный и внутренний диаметры сердечника.

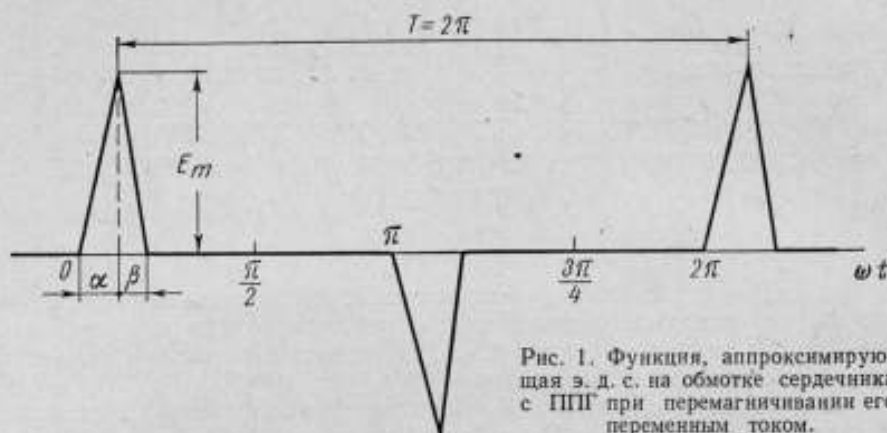


Рис. 1. Функция, аппроксимирующая э. д. с. на обмотке сердечника с ППГ при перемагничивании его переменным током.

Из выражения (3) для кольцевого сердечника с обычным соотношением размеров ( $\frac{d}{D} = 0,7 \div 0,8$ ) получают, например,  $K_a = 10$  при  $H_m = 4H_c$ .

Основная частота интегратора должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить передачу достаточного количества высших гармоник э. д. с. без заметных искажений по амплитуде и фазе.

В квазистатическом режиме сигнал на выходе фотокompенсационного микроверметра в каждый момент времени пропорционален магнитному потоку в измеряемом сердечнике; однако он несколько запаздывает, что обусловлено временем реакции прибора. На очень низких частотах (порядка десятых и сотых долей герца) запаздывание сигнала практически не отражается на точности воспроизведения кривой независимо от ее формы. Нижний предел частоты, на которой работает прибор, должен быть выше критической частоты, определяемой постоянной времени саморазряда интегрирующей емкости (сползание нуля).

Структурная схема микроверметра представлена на рис. 2, а. Рассмотрим передаточные функции отдельных звеньев схемы [4—6].

Передаточные функции измерительной катушки ИК, преобразователя напряжения в ток (входного контура ВК) и гальванометра Г будут соответственно:

$$Y_{ИК}(p) = \frac{e_x(p)}{\Phi_x(p)} = p;$$

$$Y_{ВК}(p) = \frac{i(p)}{e_0(p)} = \frac{1}{\sum r(1 + \tau_{Г}p)};$$

$$Y_{Г}(p) = \frac{\theta(p)}{i(p)} = \frac{\Psi}{Jp^2 + P_{в}p + W_{м}},$$



- где  $\rho$  — оператор Лапласа;  
 $e_x$  — мгновенное значение э. д. с., соответствующее измеряемому магнитному потоку  $\Phi_x$ ;  
 $i$  — мгновенное значение тока;  
 $e_0$  — напряжение, действующее во входном контуре;  $e_0 = e_x - e_{o.c} - e_n$  ( $e_{o.c}$  и  $e_n$  — напряжение обратной связи и напряжение реакции гальванометра, равное  $\psi\theta\rho$ );  
 $\sum r$  и  $\tau_r$  — суммарное сопротивление и постоянная времени цепи гальванометра  $\Gamma$ ;  $\tau_r = \frac{L}{\sum r}$  ( $L$  — индуктивность цепи);  
 $\theta$  — угол поворота рамки гальванометра;  
 $\psi$  — потокосцепление рамки, равное  $BS\omega$  ( $B$  — индукция в зазоре гальванометра;  $S$  и  $\omega$  — соответственно площадь и число витков рамки);  
 $J$  — момент инерции подвижной части;  
 $P_n$  — коэффициент воздушного успокоения;  
 $W_m$  — постоянная момента растяжек.

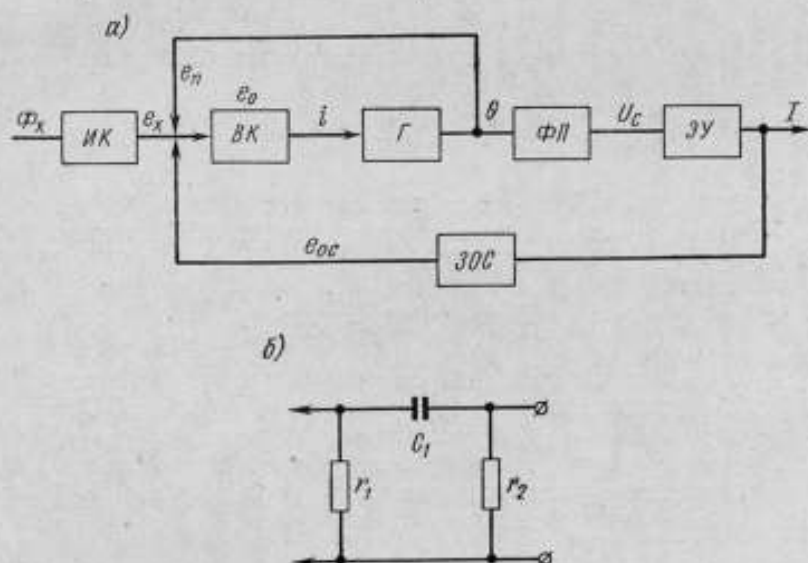


Рис. 2. Структурная схема микроамперметра (а) и звено обратной связи (б).

Общая передаточная функция входного контура и гальванометра имеет вид

$$Y_{\text{ВКГ}}(\rho) = \frac{Y_{\text{ВК}}(\rho) Y_{\Gamma}(\rho)}{1 + Y_{\text{ВК}}(\rho) Y_{\Gamma}(\rho)} = \frac{\psi}{\sum r [\tau_r \rho^2 + (J + \tau_r P_n) \rho + (P_n + P + \tau_r W_m) \rho + W_m]} \quad (4)$$

здесь  $P$  — коэффициент успокоения гальванометра во входном контуре, равный  $\frac{\psi^2}{\sum r}$ .

Так как  $P_n$ ,  $W_m$  и  $\tau_r$  весьма малы, то уравнение (4) можно упростить:

$$Y_{\text{ВКГ}}(\rho) = \frac{\psi}{\sum r (J \tau_r \rho^2 + J \rho^2 + P \rho + W_m)}$$

Передачная функция фотооптического преобразователя ФП

$$Y_{\text{ФП}}(p) = \frac{U_c(p)}{\theta(p)} = \frac{2 \frac{f}{b} \cdot \frac{a-1}{a+1} U_{\Phi}}{1 + \tau_{\Phi} p},$$

где  $f$  — расстояние от объектива перед зеркалом гальванометра до светоделяющего зеркала;

$U_c$  — напряжение сигнала на входе электронного усилителя;

$b$  — ширина диафрагмы перед фотосопротивлением;

$a$  — кратность фотосопротивлений (отношение темнового сопротивления к световому);

$U_{\Phi}$  — напряжение на фотосопротивлениях;

$\tau_{\Phi}$  — постоянная времени фотосопротивлений.

Обозначим выражение  $2 \frac{f}{b} \cdot \frac{a-1}{a+1} U_{\Phi}$  через  $K$ , тогда

$$Y_{\text{ФП}}(p) = \frac{K}{1 + \tau_{\Phi} p}.$$

Передачная функция электронного усилителя ЭУ равна

$$Y_{\text{ЭУ}}(p) = \frac{I(p)}{U_c(p)} = s_{\text{дин}},$$

где  $s_{\text{дин}}$  — динамическая крутизна усилителя.

Передачная функция звена обратной связи ЗОС, показанного на рис. 2, б, будет

$$Y_{\text{ЗОС}}(p) = \frac{K_{o.c.}}{1 + \tau_{\text{ЗОС}} p},$$

где  $K_{o.c.}$  — коэффициент обратной связи, равный  $r_1 r_2 C$  (здесь  $r_1$ ,  $r_2$  и  $C$  — соответственно сопротивления и емкость ЗОС);

$\tau_{\text{ЗОС}}$  — постоянная времени звена обратной связи,  $\tau_{\text{ЗОС}} = (r_1 + r_2) C$ .

Звено обратной связи рассматривают как звено направленного действия, оно не является нагрузкой для входного контура.

Общая передачная функция системы будет

$$Y_{\Sigma}(p) = \frac{I(p)}{\Phi_x(p)} = \frac{(1 + \tau_{\text{ЗОС}} p) \varepsilon p}{(J \tau_r p^2 + J p^2 P p + W_M) (1 + \tau_{\Phi} p) (1 + \tau_{\text{ЗОС}} p) + \varepsilon K_{o.c.} p}, \quad (5)$$

где

$$\varepsilon = \frac{\Psi K s_{\text{дин}}}{\sum r}.$$

Частотные характеристики (рис. 3, а) системы получают из выражения (5), заменяя  $p$  на  $j\omega$  и вычисляя модуль; фазовые (рис. 3, б) определяют по формуле

$$\varphi = \arctg \left( -\frac{1}{\omega \tau_{\text{ЗОС}}} \right) - \arctg \frac{\omega A - \omega^2 D + \omega^2 M}{W_M - \omega^2 N + \omega^2 G}, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 A &= P + W_m (\tau_\phi + \tau_{30c}) + eK_{o.c}; \\
 D &= J\tau_r + J (\tau_\phi + \tau_{30c}) + P\tau_{30c}\tau_\phi; \\
 M &= J\tau_r\tau_{30c}\tau_\phi; \\
 N &= J + P (\tau_\phi + \tau_{30c}) + W_m\tau_{30c}\tau_\phi; \\
 G &= J [\tau_r (\tau_\phi + \tau_{30c}) + \tau_{30c}\tau_\phi].
 \end{aligned}$$

Эти характеристики были определены для системы с фотоусилителем Ф-17/1 при двух значениях коэффициента обратной связи. Аналогичные характеристики можно получить для микроверметра типа Ф-18 с отклю-

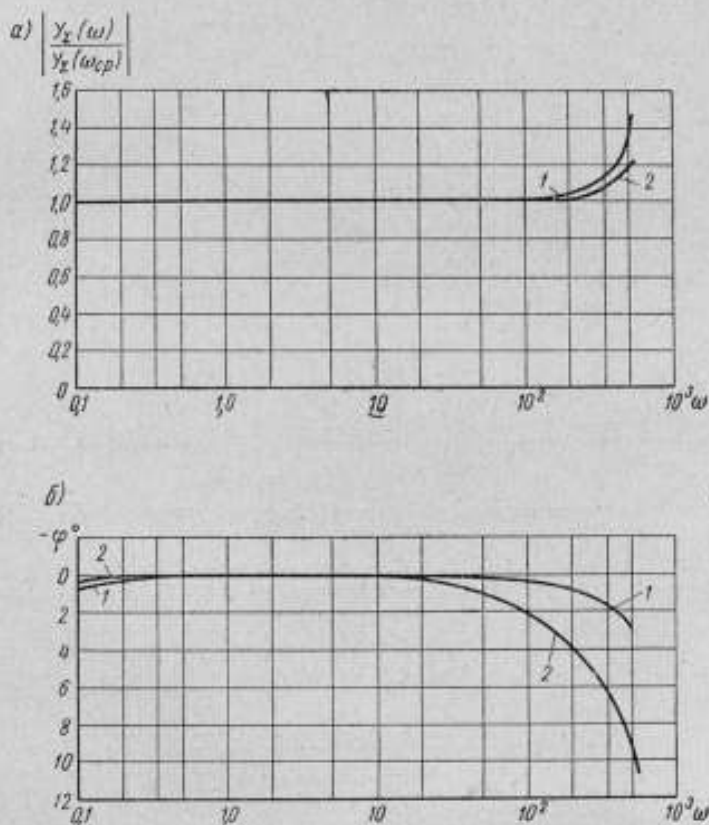


Рис. 3. Частотные (а) и фазовые (б) характеристики микроверметра: 1 и 2 — соответственно  $K_{o.c} = 10^{-2}$  и  $K_{o.c} = 2 \cdot 10^{-2}$  об/а.

ченной стабилизирующей цепью. Для уменьшения помех все его цепи питают от батарей.

Динамические петли перемагничивания можно определять осциллографическим методом на электронно-лучевом феррометре.

Исследование спектрального состава э. д. с. при перемагничивании сердечника периодическим полем звуковой частоты производилось методом тригонометрических рядов и экспериментально — посредством анализатора гармоник. Было установлено, что с повышением частоты практическая ширина спектра э. д. с. перемагничивания ферритовых сердеч-

ников с ППГ несколько уменьшается. Это согласуется с приращением коэрцитивной силы  $\Delta H_c$ , а также с уменьшением крутизны восходящей и нисходящей ветвей петли перемагничивания на повышенных частотах, которое вызвано магнитной вязкостью материала сердечника [6, 7].

Несмотря на некоторое уменьшение ширины спектра э. д. с. аппарата, предназначенная для осциллографирования петель сердечников с ППГ на звуковых частотах, должна обеспечивать неискаженную передачу, по крайней мере, нескольких сотен гармоник основной частоты. Иными словами, интегрирующее устройство должно быть широкополосным. Принципиальная схема электронного интегратора с учетом распределенных емкостей показана на рис. 4.

Была исследована зависимость рабочей полосы интегратора от параметров элементов схемы.

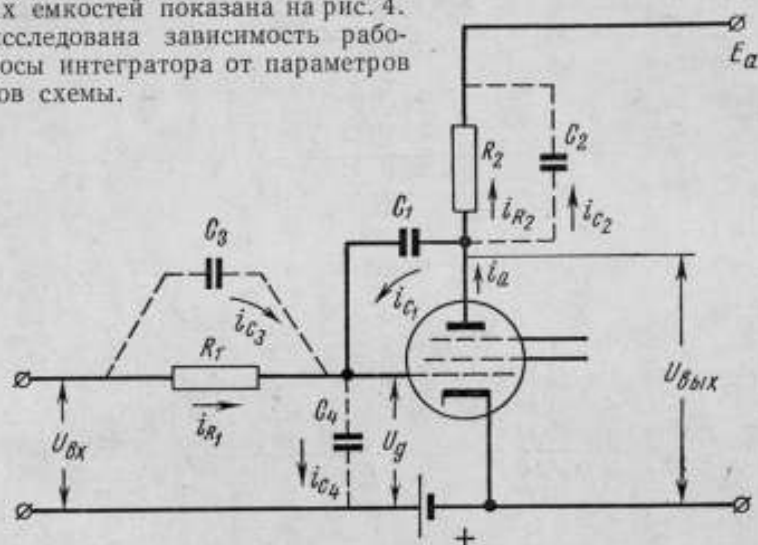


Рис. 4. Принципиальная схема электронного интегратора с учетом распределенных емкостей:

$C_1$  — емкость цепи обратной связи;  $C_2$ ,  $C_3$  и  $C_4$  — распределенные емкости;  $U_{вх}$  и  $U_{вых}$  — напряжения на входе и выходе интегратора;  $U_g$  — напряжение на сетке;  $E_a$  — напряжение источника анодного питания.

Выражение комплексного коэффициента передачи для реальных схем [1] имеет вид

$$W_{\Sigma}(j\omega) = - \frac{s + R_1 C_1 C_3 \omega^2 - j\omega (C_1 - s R_1 C_3)}{\frac{1}{R_2} - R_1 C_1 C_3 \omega^2 - j\omega R_1 C_1 s}, \quad (7)$$

где  $R_1$  и  $C_1$  — элементы цепи обратной связи;

$s$  — коэффициент крутизны лампы;

$C$  — суммарная распределенная емкость, равная  $C_2 + C_3 + C_4$ .

Из (7) можно получить расчетные формулы для модуля коэффициента передачи и фазового угла:

$$|W_{\Sigma}| = K_0 \sqrt{\frac{1 + \Omega^2 \left[ \left( \frac{C_3}{C_1} \right)^2 + \left( \frac{1}{s R_1} \right)^2 \right] + \Omega^4 \left( \frac{C_3}{\tau_{30C}} \right)^2}{1 + \Omega^2 \left( K_0^2 - 2 \frac{\tau}{\tau_{30C}} \right) + \Omega^4 \left( \frac{\tau}{\tau_{30C}} \right)^2}}; \quad (8)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega (C_1 - s R_1 C_3)}{s + \tau_{30C} C_3 \omega^2} - \arctg \frac{\omega s \tau_{30C}}{\frac{1}{R_2} - \tau_{30C} C_3 \omega^2}, \quad (9)$$

где  $K_0$  — коэффициент усиления интегратора без обратной связи;  $K_0 = SR_2 = 100$ ;

$\Omega$  — обобщенная частота, равная  $\omega\tau_{\text{зос}}$ ;

$\tau_{\text{зос}}$  — постоянная звена обратной связи, равная  $R_1C_1$ ;

$\tau$  — постоянная усилителя, равная  $R_2C$ .

На рис. 5, а, б приведены графики частотных и фазовых характеристик интегратора, построенные для различных значений постоянной инте-

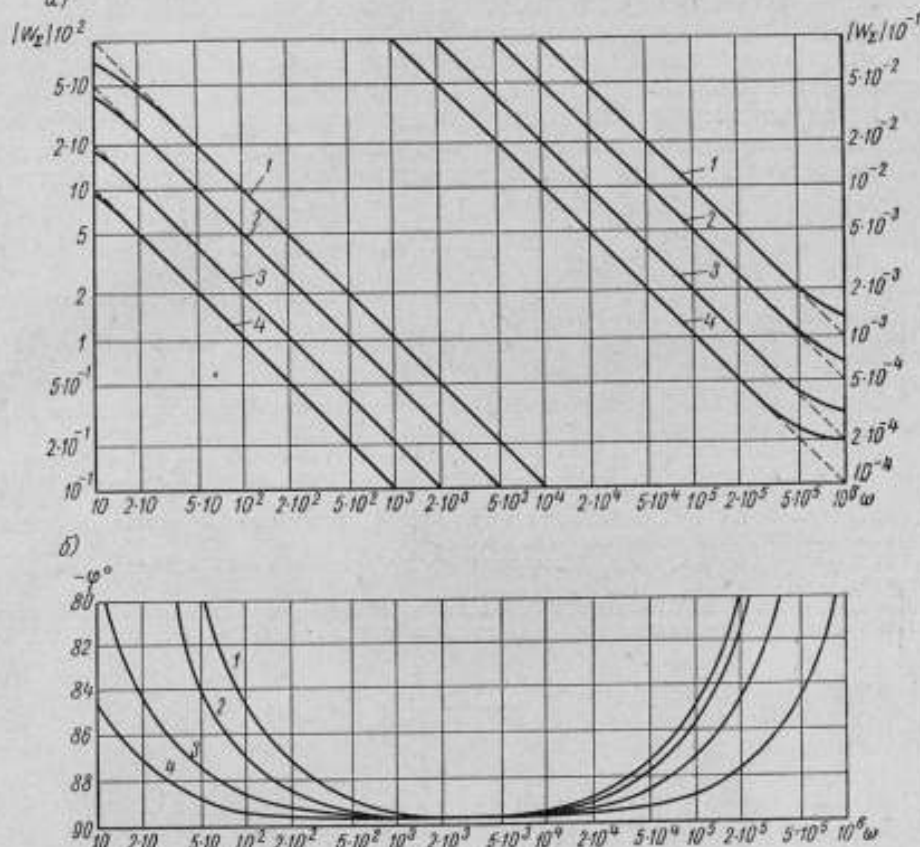


Рис. 5. Частотные (а) и фазовые (б) характеристики интегратора: 1, 2, 3 и 4 — соответственно  $R_1C_1(K_0 + 1) = 0,1; 0,2; 0,5; 1,0$  при  $K_0 = sR_2 = 100$ ;  $\tau = R_2C = 2 \cdot 10^{-7}$ ;  $C_1/C_2 = 10^4$ .

грирования согласно формулам (8) и (9). Из графиков видно, что в зависимости от частоты целесообразно изменять параметры цепи обратной связи. Фазовые искажения в несколько градусов на высоких частотах допустимы, так как высшие гармоники сильно ослабляются интегратором (примерно 20 дБ на декаду) и воспроизводятся на осциллограмме в другом угловом масштабе по отношению к основной частоте.

Среднюю квадратическую ошибку интегрирования функции, показанной на рис. 1, при воспроизведении  $n$  гармоник определяют из равенства Бесселя, которое для данного случая принимает вид

$$\delta = \frac{E_m^2}{3} \cdot \frac{\alpha + \beta}{\pi} - \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\frac{1}{2}(n-1)} (a_{2k+1}^2 + b_{2k+1}^2),$$

где  $a_{2k+1}$  и  $b_{2k+1}$  — коэффициенты ряда  $(k = 0, 1, 2, 3, \dots, \frac{n-1}{2})$ ;  
 $E_m$  — амплитудное значение функции.

### Выводы

1. Изменение чувствительности микроверметра посредством цепи обратной связи влияет на частотную и фазовую характеристики прибора.
2. При измерениях частота должна быть не выше 0,5 гц для микроверметров с фотосопротивлениями типа ФСК-7. Для повышения рабочей частоты необходима замена ФСК-7 фотоэлементами или кремниевыми фотосопротивлениями.
3. Ход характеристик интегрирующего усилителя феррометра в области низких частот зависит только от произведения  $R_1 C_1$ , в то время как на высоких частотах на него влияет также соотношение этих величин.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Горичев Н. П. К вопросу о динамических измерениях ферромагнетиков. «Труды НИИТС», № 15. Л., 1965.
2. Зыри А. В. и Тульчинский А. Н. Особенности магнитных измерений параметров сердечников с ППГ. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
3. Иоффе А. Ф., Филинов Е. Н. Измерение параметров ферритовых сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса. М.—Л., ГЭИ, 1963.
4. Куликовский Л. Ф., Мелих-Шихназаров А. М., Рабинович С. Г., Селибер Б. А. Гальванометрические компенсаторы. М.—Л., «Энергия», 1964.
5. Рабинович С. Г., Ткаченко А. Н. К расчету фотоэлектрического флюксметра. «Измерительная техника», 1959, № 5.
6. Касперович А. Н. Фотоэлектрические усилители Ф-17. «Измерительная техника», 1959, № 5.
7. Кобелев В. В. Осциллографическая установка для снятия петли гистерезиса малых ферритовых сердечников. Сб. «Магнитные элементы». М., ИТМ и ВТ АН СССР, 1960.

# СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

УДК 621.318.12 + 621.318.2

Е. Г. ШРАМКОВ

## О ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ И О СПРАВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Для включения в соответствующие стандарты и другие нормативные документы следует разграничивать характеристики\*, по которым осуществляют сдачу и приемку материалов и готовых изделий (магнитов), и справочные, наиболее полно отражающие свойства материалов и необходимые при расчете, конструировании и эксплуатации устройств с магнитами. Для контроля технологических процессов изготовления материалов и магнитов, а также при разработке новых видов материалов иногда бывает необходимо определять и другие характеристики, которые не входят в указанные две группы. Во многих случаях требуется контролировать свойства материалов в готовых изделиях — литых, металлокерамических и оксидных магнитах.

При разработке постоянных магнитов и магнитных систем, а также оценке их поведения в эксплуатации основными характеристиками материала являются размагничивающая часть предельной петли гистерезиса (с указанием максимального значения напряженности намагничивающего поля  $H_m$ ) и частные петли гистерезиса внутри размагничивающей части. Последние, как известно, заменяют средней магнитной проницаемостью, определяемой по наклону этих петель. Характеристики необходимо определять при различных температурах в зависимости от вида материала и его практического использования. В настоящее время можно указать наибольший диапазон:  $(-180) \div (+550)$  °С.

Целесообразно также получать семейство размагничивающих кривых при намагничивании в полях напряженностью меньше  $H_m$ , так как рабочие точки магнитов и магнитных систем часто бывают расположены на этих кривых.

Вопрос о формах графического представления магнитных характеристик, в частности магнитной энергии, наиболее удобных для практического использования, в статье не рассмотрен, так как это не имеет принципиального значения.

Помимо магнитных в качестве справочных характеристик желательно иметь и такие, которые отражают другие физические свойства материала,

\* Имеются в виду характеристики магнитотвердых материалов, а также постоянных магнитов из этих материалов, применяемых в различного рода приборах, механизмах и устройствах, за исключением магнитных лент, проволоки и магнитов, которые работают в условиях переменного намагничивания.

а именно: твердость, предел упругости, модуль сдвига, температурный коэффициент линейного расширения, удельный вес и удельное электрическое сопротивление.

Так как постоянный магнит предназначен для создания во внешнем пространстве магнитного поля, то основными его характеристиками следует считать магнитную индукцию и ее распределение в рабочем пространстве магнита. Конфигурация магнитной системы при определении этих величин должна соответствовать (в магнитном отношении) рабочим условиям магнита.

В некоторых случаях практического применения основной характеристикой является магнитный момент. При относительной оценке однотипных (по форме и размерам) магнитов из одного и того же материала такой характеристикой может быть остаточная индукция (или поток).

Весьма существенно поведение магнитов при нагревании и охлаждении, воздействии вибраций и ударов, постоянных и переменных магнитных полей. Воздействие на них различного рода излучений [1] до сих пор еще недостаточно изучено.

Влияние на магнит положительных и отрицательных температур вызывает: структурные и связанные с ними изменения магнитных свойств, необратимые (могут быть восстановлены только новым намагничиванием магнита) или обратимые изменения магнитного состояния (восстановление магнитных свойств, когда магнит принимает нормальную температуру). При надлежащей технологии изготовления магниты из современных материалов, за исключением ферритов на основе окиси бария и окиси железа, не подвержены структурным изменениям в широком диапазоне температур:  $(-180) \rightarrow (+550)$  °С. Несмотря на это необходимо производить проверку структурной стабильности магнитов из различных материалов, особенно из вновь разрабатываемых.

Необратимые изменения магнитного состояния зависят не только от материала магнита, но и от его формы и размеров. Если же последний составляет часть магнитной цепи с ферромагнитным материалом, то необратимые изменения под влиянием температуры будут иными, чем для одного магнита. Известно, что циклическим воздействием положительных и отрицательных температур магнит или систему можно стабилизировать в отношении последующих нагреваний или охлаждений [2]. Поэтому для отдельных партий магнитов или систем необходимо указывать температурную стабильность.

Обратимые изменения характеризуются температурным коэффициентом магнитной индукции или магнитного момента магнита. Приходится учитывать зависимость этого коэффициента от интервала температур, а также влияние на него другого ферромагнитного материала (в случае магнитной системы) в магнитной цепи.

Следует характеризовать влияние внешних магнитных полей на магниты и магнитные системы, частично размагниченные и неразмагниченные, проходившие и не проходившие температурную стабилизацию. При этом необходимо рассматривать влияние постоянного магнитного поля разной напряженности и различным образом ориентированного по отношению к магниту и всей цепи, а также переменного (периодического и импульсного) поля различной частоты в зависимости от условий эксплуатации магнита. Не менее важна стабильность магнитов и систем во времени после температурной и магнитной стабилизации, а также без нее, особенно в начальный период после намагничивания.

Влияние на магниты температуры и внешних магнитных полей, методы температурной и магнитной стабилизации достаточно хорошо исследованы и описаны в литературе, что дает возможность выбрать методику стабили-



зации магнитов и унифицировать указанные выше характеристики [3—5]. Механические же воздействия (удары, вибрации) изучали многие исследователи, однако имеющиеся материалы по этому вопросу еще не дают возможности сделать должные выводы. Необходимо разработать единую методику исследования этих воздействий, с тем чтобы получаемые результаты были сопоставимыми.

Чтобы охарактеризовать материал в готовом изделии (магните), применяют один из трех способов исследования: а) на готовом изделии; б) на образце, вырезанном из магнита таких размеров и формы, которые допускали бы определение размагничивающей части предельной петли гистерезиса и средней проницаемости; в) на образце требуемых размеров и формы, изготовленном из того же материала, что и магнит. Для обеспечения наиболее надежных данных может быть рекомендован первый способ, однако он не всегда осуществим. Другие же два не гарантируют получения характеристик материала, идентичных характеристикам материала в магнитах. Поэтому всегда следует указывать форму и размеры образцов, на которых определялись характеристики, технологию их обработки и методы измерения характеристик.

**Нормативные документы.** В настоящее время в СССР действуют следующие стандарты на магнитотвердые материалы и постоянные магниты: ГОСТ 4402—48, ГОСТ 6862—54 и ГОСТ 9575—60. Однако не на все материалы, из которых изготавливают магниты (например, металлокерамические и оксидные), есть стандарты. Кроме того, они устарели и нуждаются в пересмотре.

В ГОСТ 4402—48 нормированы остаточная индукция  $B_r$ , коэрцитивная сила по индукции  $H_{св}$  и максимальная величина магнитной энергии  $\left(\frac{BH}{2}\right)_m$ , а в ГОСТ 6862—54 вместо последней величины нормировано произведение  $B_r H_{св}$ . В ГОСТ 9575—60 кроме перечисленных выше характеристик указаны индукция и напряженность поля, соответствующие максимальной магнитной энергии; последнюю величину контролируют выборочно, а коэрцитивную силу определяют либо по индукции, либо по намагниченности — в зависимости от метода измерения (пермеаметр или коэрцитиметр). Для магнитов сложной формы предусмотрен контроль остаточного магнитного потока или магнитного момента; магнитные же свойства материала определяют на образцах прямоугольной формы, вырезанных из этих магнитов.

Ознакомление с нормативными документами различных стран показывает, что за рубежом контролируют те же характеристики материалов, что и в СССР с добавлением в отдельных случаях средней магнитной проницаемости. Контроль готовых изделий, осуществляемый фирмами, изготавливающими магниты, производится по индукции в рабочем зазоре в условиях, близких к условиям работы магнита в изделии [6, 7].

На основании изложенного выше предлагаем:

1. В стандарты и другие нормативные документы на магнитотвердые материалы ввести в качестве основной магнитной характеристики, по которой производят сдачу и приемку материала, размагничивающую часть предельной петли гистерезиса с фиксированными значениями: остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы по индукции  $H_{св}$ , максимальной магнитной энергии  $\left(\frac{BH}{2}\right)_m$ , индукции и напряженности поля для этой точки кривой, коэффициента выпуклости петли  $K_{вып} = \left(\frac{BH}{2}\right)_m : (B_r H_{св})$  и средней магнитной проницаемости для точки петли, соответствующей максимальной магнитной энергии.

2. Контроль при сдаче и приемке готовых изделий (постоянных магнитов) производить либо по магнитной индукции в рабочем зазоре магнита в магнитной цепи, соответствующей условиям его работы, либо по остаточной индукции в нейтральном сечении, установив предварительно соответствие между этими характеристиками магнита, либо по магнитному моменту.

Браковочная характеристика устанавливается по соглашению между поставщиком и потребителем.

3. Приемочно-сдаточный контроль материала в готовых изделиях производить только для магнитов простой формы, т. е. с постоянным поперечным сечением (круглым или многоугольным) без отверстий при определенном соотношении между длиной и площадью сечения, по тем же характеристикам, что и контроль материала.

4. В качестве справочных характеристик для материалов рекомендуем:

а) размагничивающую часть предельной петли гистерезиса с указанием максимальной напряженности намагничивающего поля как при нормальной, так и при различных температурах, в зависимости от материала; наибольший диапазон  $(-180) \div (+550)^\circ\text{C}$ ;

б) семейство размагничивающих участков петель гистерезиса при намагничивании в полях напряженностью меньше  $H_m$  при различных температурах;

в) кривые удельной магнитной энергии по данным пп. «а» и «б»;

г) среднюю магнитную проницаемость для различных точек размагничивающей части петель гистерезиса при условиях, указанных в пп. «а» и «б»;

д) твердость, предел упругости, модуль сдвига, температурный коэффициент линейного расширения, удельный вес;

е) удельное электрическое сопротивление.

5. В качестве справочных характеристик для постоянных магнитов рекомендуем такие, по которым осуществляют сдачу и приемку магнитов, с добавлением следующих параметров:

а) температурного коэффициента указанных характеристик в различных интервалах температур, в зависимости от материала магнита; наибольший диапазон температур  $(-180) \div (+550)^\circ\text{C}$ ;

б) коэффициента стабильности во времени непосредственно после намагничивания, а также после магнитной и температурной стабилизации:

$$K_{\text{ст}} = \frac{B_{t_2} - B_{t_1}}{B_{t_1} \lg \frac{t_2}{t_1}},$$

где  $B_{t_2}$  и  $B_{t_1}$  — магнитные индукции в рабочем зазоре или в нейтральном сечении магнита, измеренные через промежутки времени  $t_2$  и  $t_1$  после его намагничивания;

в) стабильности по отношению к нагреванию и охлаждению (необратимые изменения магнитного состояния), внешним (постоянным и переменным) магнитным полям и механическим воздействиям (удары, вибрации и др.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gould T. E. Permanent Magnet Stability. Instrument Practice, 1958.
2. Clegg A. G. Effect of low temperature on the stability of permanent magnets. «British J. appl. phys.», 1955, № 6.

3. Шрамков Е. Г., Миткевич А. В., Ковалев Н. Б. Исследование методов стабилизации магнитных систем с постоянными магнитами. «Груды ЛПИ», № 184. М.—Л., ГЭИ, 1956.
4. Миткевич А. В., Шрамков Е. Г. Исследование стабильности магнитных систем с внутрирамочными магнитами и определение их температурного коэффициента. «Электричество», 1962, № 1.
5. Миткевич А. В., Шрамков Е. Г. Стабильность магнитных систем с литыми магнитами для электроизмерительных приборов. Сб. докладов на Всесоюзном совещании по литым сплавам для постоянных магнитов. Саратов, изд. «Коммунист», 1964.
6. Рейнбот Г. Технология и применение магнитных материалов. Перевод с немецкого. М.—Л., ГЭИ, 1963.
7. Постоянные магниты. Справочник. Перевод с английского. М.—Л., ГЭИ, 1963.

### О МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РОТОРОВ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Магнитотвердые материалы (МТМ), используемые ранее почти исключительно для изготовления постоянных магнитов, за последние 15 лет все большее применение находят в электромагнитных устройствах, работающих в динамическом режиме.

В системах автоматического управления, звукозаписи и связи широко распространены гистерезисные синхронные электродвигатели [1]. Известны также гистерезисные муфты и тормоза. Появились электродвигатели с постоянными магнитами и гистерезисным пуском, а также с катящимся ротором из МТМ.

Серийное производство гистерезисных двигателей, в том числе гидродвигателей, налажено в СССР [2], США, Японии, ФРГ и других странах. Отечественными конструкторскими бюро и научно-исследовательскими институтами накоплен значительный опыт расчета и проектирования различных видов таких двигателей.

Динамическое перемагничивание МТМ ротора. Статор гистерезисного двигателя представляет собой статор обычной машины переменного тока. Ротор выполнен из МТМ, как правило, в виде пустотелого цилиндра на магнитной или немагнитной втулке. МТМ, составляющий активную часть ротора, предварительно не намагничивают. Он намагничивается при пуске, после чего перемагничивается вращающимся полем статора.

По существующим воззрениям, вращающий гистерезисный момент двигателя обусловлен наличием пространственного сдвига (угла запаздывания  $\gamma_r$ ) между магнитной индукцией в роторе и намагничивающей силой статора в процессе динамического перемагничивания МТМ. С другой стороны, он пропорционален потерям МТМ ротора на гистерезис за цикл перемагничивания [3]. В идеальном двигателе, т. е. при отсутствии высших гармоник индукции и вихревых токов в роторе, максимальный гистерезисный момент определяется магнитными свойствами МТМ ротора (при прочих равных условиях) и не зависит от скорости вращения и частоты питания. Следовательно, он должен быть одинаковым в режиме пуска и асинхронном режиме работы двигателя.

Во вращающемся магнитном поле различают, как известно, два основных вида динамического перемагничивания ферромагнитного материала: круговое, когда магнитная индукция в каждой точке материала изменяет во времени свое направление, сохраняя неизменной величину (годограф

вектора \* индукции — окружность), и эллиптическое, когда индукция изменяет не только свое направление, но и величину (годограф вектора индукции — эллипс). В гистерезисном двигателе они имеют место лишь при массивном роторе.

Круговое перемагничивание можно наблюдать в сплошном роторе из МТМ (без втулки), если намагничивающая сила двухполюсного статора распределена синусоидально и фазы симметричны (рис. 1, а), а эллиптическое — в случае несимметричности фаз. В двигателях обычных конструкций с тонкостенным ротором материал перемагничивается бегущим магнитным полем. При этом в роторе 1 (рис. 1, б) на немагнитной втулке 2 преобладает тангенциальное направление линий магнитной индукции, а в роторе 3 (рис. 1, в) на магнитной втулке 4 — радиальное.

В реальных гистерезисных двигателях процессы динамического перемагничивания очень сложны и зависят не только от свойств материала и конструкции ротора, но и от режима работы, числа пар полюсов, выполнения обмотки статора и пазов, частоты питания. На МТМ ротора одновременно воздействуют магнитные поля различных частот из-за наличия высших гармоник индукции — временных, обмоточных и зубцовых. В некоторых его областях эти поля взаимно перпендикулярны в пространстве. Распределение магнитной индукции в роторе резко неравномерно и изменяется в зависимости от режима работы двигателя.

**Основные требования, предъявляемые к магнитным свойствам МТМ для роторов.** Успешное развитие гистерезисных двигателей началось только в 30—40-е гг. и связано с появлением новых магнитных материалов: сначала мартенситных кобальтовых сталей, а затем сплавов дисперсионного твердения типа Fe—Ni—Al (альни) и Fe—Ni—Al—Co (альнико) и пластических деформируемых сплавов типа Fe—Co—V (викаллоу). Все эти материалы отличаются высокими удельными потерями на гистерезис  $p_{г.в}$ , которые обеспечивают, как указывалось выше, необходимый вращающий момент (полезную мощность) двигателя.

При разработке новых сплавов для роторов или выборе материала в процессе проектирования двигателя в качестве расчетных используют динамические магнитные характеристики МТМ, которые, как известно, зависят не только от магнитных свойств материала, но и отражают электромагнитные процессы при его динамическом перемагничивании [4]. Важной расчетной характеристикой МТМ ротора реального двигателя является зависимость удельных потерь на гистерезис и вихревые токи от амплитуды магнитной индукции  $p_{г.в} = F(B_m)$  [5]. Другая характеристика — динамическая кривая намагничивания  $B_m = F(H_m)$ , так как напря-

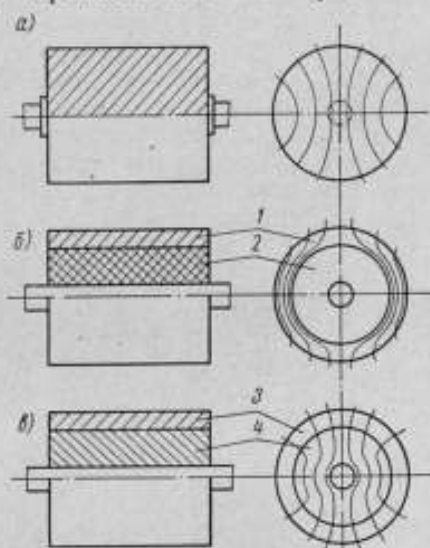


Рис. 1. Распределение магнитной индукции в роторах гистерезисных двигателей: а — в сплошном; б — в тонкостенном на немагнитной втулке; в — в тонкостенном на магнитной втулке.

\* Годограф вектора представляет собой геометрическое место его концов при изменении во времени.

женность магнитного поля  $H_m$  в МТМ определяет требуемую намагничивающую силу обмотки статора. Проектирование и анализ работы гистерезисного двигателя невозможны без знания семейств этих характеристик, полученных для МТМ во вращающихся магнитных полях с различными коэффициентами эллиптичности \*  $k_{эл}$  [6]. Примерный вид таких зависимостей известен из результатов экспериментов, описанных в работах [7, 8]. При круговом ( $k_{эл} = 1$ ) и близком к нему характере перемагничивания кривая удельных потерь на гистерезис и вихревые токи имеет в некоторой точке максимум (рис. 2). Это подтверждается экспериментальными данными для электротехнических сталей [9], а также теорией фер-

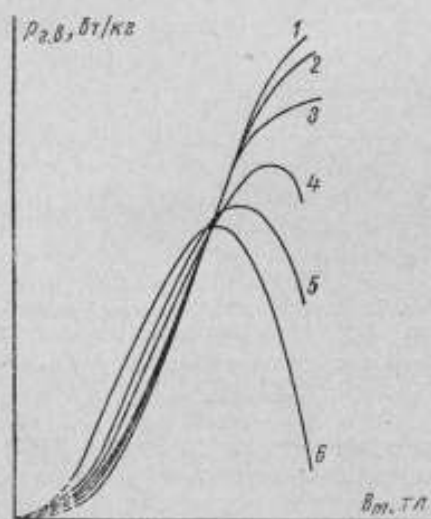


Рис. 2. Кривые удельных потерь на гистерезис и вихревые токи в МТМ при различных коэффициентах эллиптичности  $k_{эл}$  магнитного поля: 0 (1); 0,2 (2); 0,4 (3); 0,6 (4); 0,8 (5); 1 (6).

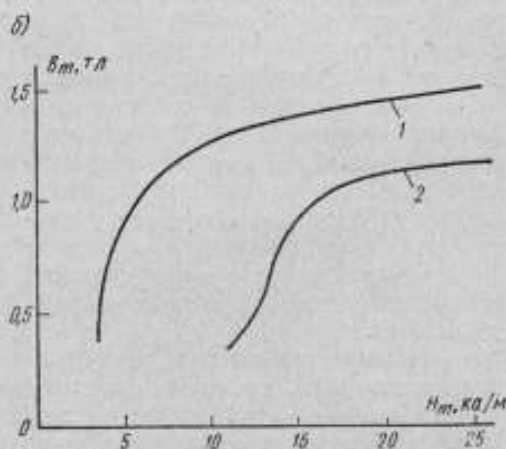
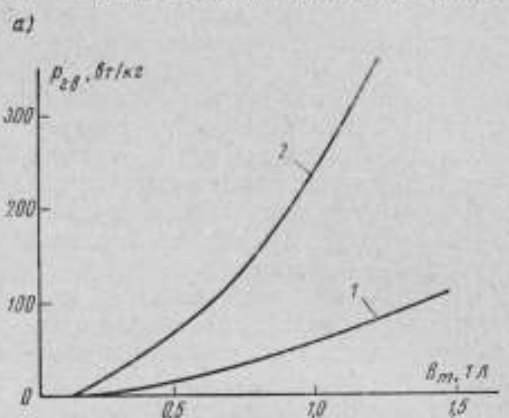


Рис. 3. Зависимость удельных потерь на гистерезис и вихревые токи от амплитуды магнитной индукции (а) и динамическая кривая намагничивания (б) викаллой марки 52КФВ при частоте 50 гц: 1 и 2 — температура отпуска соответственно 480 и 560°С.

ромагнетизма [10]. При линейном перемагничивании в переменном магнитном поле ( $k_{эл} = 0$ ) потери постоянно возрастают с увеличением амплитуды индукции.

Однако до сих пор не получены достоверные характеристики МТМ во вращающемся магнитном поле. На практике при расчете двигателей часто ограничиваются рассмотрением зависимостей  $\rho_{г.в} = F(B_m)$  и  $B_m = F(H_m)$  в переменном поле (рис. 3, а, б), т. е. принимают характер

\* Коэффициент эллиптичности равен отношению малой и большой осей эллипса — годографа магнитной индукции.

динамического перемагничивания МТМ ротора близким к линейному.

Основное требование, предъявляемое к энергетическим показателям гистерезисного двигателя, — наибольшее отношение полезной мощности на его валу к потребляемой. Это отношение зависит от свойств МТМ ротора и определяется коэффициентом выпуклости  $k_{\text{вып}}$  динамической петли, равным отношению площади петли  $P_{r, \text{по}}$  к площади описанного прямоугольника со сторонами  $2B_m$  и  $2H_m$  [5]:

$$k_{\text{вып}} = \frac{P_{r, \text{по}}}{4B_m H_m}$$

Коэффициент выпуклости является критерием качества МТМ. Чем выше  $k_{\text{вып}}$  (чем ближе форма петли к прямоугольной), тем лучше при прочих равных условиях МТМ ротора.

Зависимость  $k_{\text{вып}} = F(B_m)$  также важная характеристика МТМ (рис. 4). Исследования [11, 12] показали, что динамическая петля с максимальным для данного материала коэффициентом выпуклости соответствует точке максимума амплитудной магнитной проницаемости  $\mu$ . Поскольку МТМ наиболее целесообразно использовать в полях вблизи максимальной величины  $k_{\text{вып}}$ , то в качестве справочных параметров МТМ гистерезисных двигателей указывают магнитные величины  $B_m$ ,  $H_m$ ,  $P_{r, \text{по}}$  и  $k_{\text{вып}}$  в точке максимума  $\mu$ .

Свойства МТМ и их влияние на энергетические показатели двигателя оценивают и по углу гистерезиса (по первым гармоникам  $\gamma_{01}$ ), также являющемуся критерием качества.

Из параметрического представления динамической петли следует, что при синусоидальной индукции  $B = B_m \sin \omega t$  ( $\omega$  — круговая частота) площадь петли определяется только первыми гармониками индукции и напряженности поля, а также углом сдвига между ними:

$$P_{r, \text{по}} = \oint H dB = \pi B_m H_{1m} \sin \gamma_{01},$$

откуда

$$\sin \gamma_{01} = \frac{P_{r, \text{по}}}{\pi B_m H_{1m}}$$

Зависимость  $\sin \gamma_{01} = F(B_m)$  — важная характеристика МТМ, используемых для изготовления роторов гистерезисных двигателей. Чем больше  $\sin \gamma_{01}$ , тем больше при прочих равных условиях полезная мощность двигателя и, следовательно, лучше МТМ ротора.

В отдельных случаях принимают одновременно несколько критериев качества МТМ [12]:  $\frac{P_{r, \text{по}}}{H_m}$ ,  $\frac{H'_c}{H_m}$  и  $\frac{B'_r}{B_m}$  (где  $H'_c$  и  $B'_r$  — динамические коэрцитивная сила и остаточная индукция рассматриваемой динамической петли). Пользоваться этими величинами в практике менее удобно.

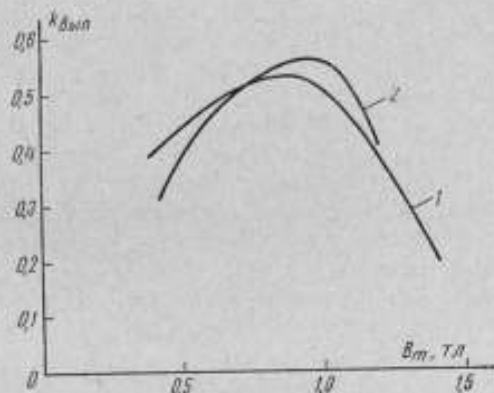


Рис. 4. Зависимость коэффициента выпуклости от амплитуды индукции никалоя 52КФВ с температурой отпуска 480 (1) и 560° С (2) при частоте 50 гц.

Анализируя работу гистерезисных двигателей в различных режимах с учетом неравномерного распределения магнитной индукции в роторе и влияния ее высших гармоник, используют семейства симметричных и несимметричных динамических петель перемагничивания МТМ ротора. Существующие критерии качества МТМ, определяемые в переменном магнитном поле, нельзя считать окончательно установленными.

Таким образом, для МТМ, применяемых в гистерезисных двигателях, можно рекомендовать основные магнитные характеристики в виде зависимостей:

1) удельных потерь на гистерезис и вихревые токи при магнитных индукциях, соответствующих рабочим индукциям в роторе,  $P_{г.в} = F(B_m)$ ;

2) коэффициента выпуклости динамической петли при тех же индукциях  $k_{вып} = F(B_m)$ ;

3) магнитной индукции от напряженности магнитного поля в роторе реального двигателя  $B_m = F(H_m)$ .

Стандартные сплавы типа альни, альнико и магнико оказались непригодными для роторов гистерезисных двигателей малой мощности, так как их удельные потери и коэффициент выпуклости непредельных петель в диапазоне рабочих напряженностей магнитного поля ротора 3—25 кА/м резко падают (рис. 5, кривые 3 и 4). Чаще всего в этих двигателях применяют сплав

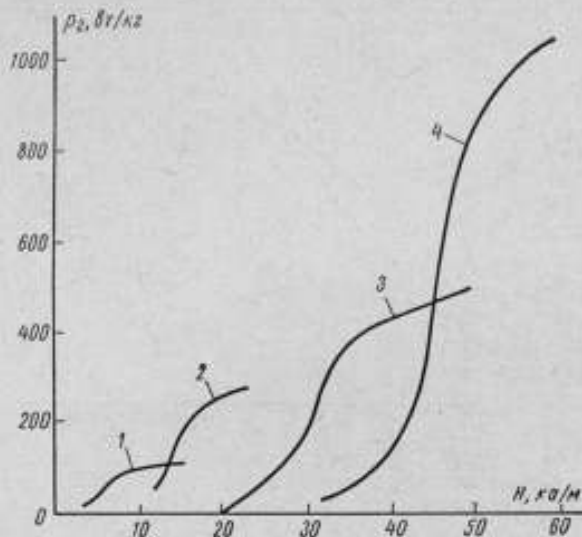


Рис. 5. Кривые удельных потерь на гистерезис для различных МТМ: викаллоя 52КФВ с температурой отпуска 480 (1) и 560° С (2), альнико (3) и магнико (4).

викаллой с 5—12% ванадия после различной термообработки [3, 13]. Например, у викаллоя 52КФВ с температурой отпуска 480 и 560° С величина  $\rho_{г.в}$  соответственно  $\leq 100$  и  $\leq 280$  Вт/кг при  $k_{вып} = 0,5 \div 0,55$  (кривые 1 и 2). К недостаткам викаллоя следует отнести его высокую стоимость и дефицитность (из-за большого содержания в нем кобальта), а также трудности изготовления.

В последние годы разработаны сплавы на основе альни [11], а также типа Fe—Co—W, Fe—Co—Mo—W [12] и другие с высокими гистерезисными свойствами. Эти сплавы могут, по-видимому, в значительной степени заменить викаллой.

Характеристики, рекомендуемые в проект стандарта на МТМ для роторов. Приемосдаточные характеристики должны отвечать основным требованиям, предъявляемым к магнитным свойствам материала, применяемого в наиболее распространенных условиях. С другой стороны, они должны быть простыми и удобными для измерения. Как показано выше, этим требованиям отвечают зависимости  $\rho_{г.в} = F(B_m)$  и  $H_m = F(B_m)$  в переменном магнитном поле при нескольких значениях  $B_m$ , включая точку, соответствующую максимуму магнитной проницаемости. Одновременное снятие данных кривых по точкам позволяет косвенно контролировать в этих точках коэффициент выпуклости динамической петли. Этого



достаточно, чтобы судить о параметрах динамических петель любого материала, так как форма петли у каждого МТМ изменяется незначительно.

Нормируя магнитные характеристики прецизионных сплавов, к которым относятся рассматриваемые материалы, необходимо ограничивать как верхние, так и нижние их числовые значения. Некоторые потребители предлагают контролировать параметры  $H_m$ ,  $H'_c$ ,  $B'_c$  динамических петель при заданных амплитудах индукции. Однако это значительно осложнило бы методику приемо-сдаточных испытаний.

Испытания МТМ следует проводить в основном на частоте 50 гц; частоту 400 гц можно рекомендовать только для МТМ, широко используемых в двигателях с повышенной рабочей частотой, из-за сложности аппаратуры. Испытание МТМ на кольцевых образцах дает возможность контролировать по единой методике магнитные свойства листовых и литых материалов. Выбор стандартных размеров и массы образцов требует специального исследования. Измерительная аппаратура при приемо-сдаточных испытаниях должна создавать в образце режим синусоидальной магнитной индукции, так как контролируемые характеристики, особенно кривая  $p_{г.в} = F(B_m)$ , зависят от высших гармоник индукции и сдвига фаз между ними.

К справочным характеристикам можно отнести:

1) в переменном поле — семейства динамических петель, зависимости  $p_{г.в} = F(B_m)$ ,  $H_m = F(B_m)$ ,  $k_{вып} = F(B_m)$ ,  $\sin \gamma_{01} = F(B_m)$  и параметры  $B_m$ ,  $H_m$ ,  $p_{г.в}$ ,  $k_{вып}$ ,  $\sin \gamma_{01}$  в точке максимума  $\mu$  на рабочих частотах в диапазоне температур  $(-60) \div (+100)$  °С, а также в условиях деформации, ускорений и вибрации;

2) во вращающемся поле — зависимости  $p_{г.в} = F(B_m)$  и  $H_m = F(B_m)$  для различных коэффициентов эллиптичности поля на рабочих частотах;

3) в случае сложного перемангничивания — магнитные характеристики при одновременном действии полей различных частот, постоянного и переменного полей, взаимно перпендикулярных и др.

Справочные характеристики получают на образцах, прошедших приемо-сдаточные испытания, на основе статистической обработки данных большого числа организаций и используют при расчете и проектировании гистерезисных двигателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Steinmetz M. Wechselstromerscheinungen. Berlin, 1900.
2. Горжевский И. И. Синхронные гистерезисные двигатели, разработанные НИИЭП. «Электромеханика и автоматика», 1958, № 2.
3. Мастяев Н. Э., Орлов И. И. Гистерезисные электродвигатели, ч. I. МЭИ, 1963.
4. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах, ч. 2. М.—Л., ГЭИ, 1936.
5. Горжевский И. И. Характеристики материала ротора гистерезисного двигателя. «Вестник электропромышленности», 1957, № 6.
6. Ларионов А. Н., Мастяев Н. Г., Орлов И. И. Гистерезисные электродвигатели. Информационный сборник. МЭИ, 1958.
7. Itterberg A. Die Eisenverluste in electrischen Maschinen. Arch. f. El. Bd. III, H. 8, 9, 1915.
8. Горжевский И. И. Исследование характеристик магнитотвердых материалов при эллиптическом перемангничивании. «Электромеханика и автоматика», 1958, № 2.
9. Baily F. The Hysteresis of iron and steel in a rotating magnetic field. Trans. Roy. Soc., 187A, 715, 1896.
10. Акулов Н. С. Ферромагнетизм. М., ОНТИ, 1939.
11. Казариновский Л. Ш. Современные материалы для гистерезисных электродвигателей. «Вестник электропромышленности», 1958, № 1.
12. Раевская М. Н. Материалы для роторов гистерезисных двигателей. «Электромеханика и автоматика», 1958, № 1.
13. Рейнбот Г. Технология и применение магнитных материалов. М.—Л., ГЭИ, 1963.

### МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В настоящее время ни в СССР, ни за рубежом промышленность не выпускает специализированную магнитоизмерительную аппаратуру для исследования и контроля магнитотвердых материалов (МТМ) в динамическом режиме, в том числе и в переменном поле. Однако в Советском Союзе разработано несколько типов такой аппаратуры.

Так, в 1957—1958 гг. во Всесоюзном научно-исследовательском институте электромеханики (ВНИИЭМ) создана установка для испытания МТМ

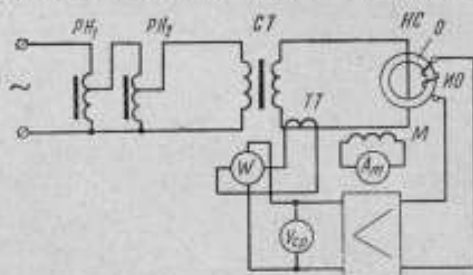


Рис. 1. Принципиальная схема установки для испытания МТМ в переменном поле.

в переменном магнитном поле на промышленной частоте, основанная на методе амперметра, вольтметра и ваттметра. Ее принципиальная схема приведена на рис. 1. Силовая часть установки содержит регуляторы напряжения  $PH_1$  и  $PH_2$  и силовой трансформатор  $СТ$ . Испытуемый кольцевой образец  $O$  намагничивается полем намагничивающего стержня  $HC$ , являющегося частью вторичного короткозамкнутого витка трансформатора. В измерительную часть входят: амперметр амплитудных значений  $A_m$ , вольтметр средних значений  $V_{cp}$ , электродинамический малокосинусный ваттметр  $W$ , градуированный электронный усилитель и проходной измерительный трансформатор тока  $ТТ$ . Амперметр выполнен как вольтметр средних значений, подключенный к вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности  $M$ . Установка позволяет определять зависимости удельных потерь от амплитуды напряженности магнитного поля  $p_{г.в} = F(H_m)$  или магнитной индукции  $p_{г.в} = F(B_m)$ , а также динамическую кривую намагничивания  $B_m = F(H_m)$  в режиме синусоидальной напряженности магнитного поля\*.

В результате многолетней эксплуатации установки ВНИИЭМ в широком диапазоне переменных магнитных полей к подобной аппаратуре выработаны технические требования.

\* См. стр. 72—77.

### К намагничивающей части установки

1. Намагничивающее устройство должно быть одновитковым, что позволяет испытывать кольцевые образцы МТМ в широком диапазоне напряженностей поля.

2. В намагничивающем стержне диаметра 12—15 мм при надежном его охлаждении (например, проточной водой) необходимо получать большие значения тока (3 ка и более).

3. Следует устранять или сводить к минимуму искажения плоскопараллельного поля в зоне образца из-за влияния конфигурации намагничивающего витка (влияние обратного провода, изгиба шти и т. д.).

### К измерительной части установки

1. Усилители к вольтметру средних значений и малокосинусному ваттметру следует выполнять отдельно из-за различия этих приборов.

2. Нижний предел входного напряжения усилителей должен быть 1—10 мВ (при 1—5 витках измерительной обмотки ИО на образце), коэффициент усиления в цепи напряжения малокосинусного ваттметра 5000—10 000.

3. Амплитудные характеристики усилителей должны иметь расширенный линейный участок.

В режиме синусоидальной напряженности поля форма кривой э. д. с. измерительной обмотки в сильных полях резко искажена и характеризуется коэффициентом амплитуды первой гармоники

$$k_{a1} = \frac{E_{\max}}{E_{1m}} = 5 \div 10,$$

где  $E_{\max}$  и  $E_{1m}$  — соответственно амплитуды э. д. с. искаженной кривой и первой гармоники, относительным коэффициентом усреднения

$$k'_{cp} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{E_{\max}}{E_{cp}} = 10 \div 15; \quad k_{cp} = \frac{E_{\max}}{E_{cp}},$$

где  $k_{cp}$  — коэффициент усреднения;

$E_{cp}$  — средняя величина э. д. с.,

а также наличием 20—30-х и более высоких гармоник.

Коэффициент линейности  $k_L$  (отношение напряжения  $U_n$ , соответствующего линейному участку, к номинальному  $U_{ном}$ ) амплитудной характеристики должен быть равен наибольшей величине:  $k_{a1}$  — для усилителя ваттметра;  $k_{cp}$  — для усилителя вольтметра средних значений. Например, у электронного усилителя ваттметра Ф-518, входящего в комплект установки типа У-5018 для испытания кольцевых образцов электротехнических сталей,  $k_L = 2$ .

4. Частотные характеристики усилителей должны соответствовать гармоническому спектру сигнала.

5. Фазовый сдвиг в усилителе ваттметра не должен превышать 10°.

В 1964—1965 гг. в Московском энергетическом институте (МЭИ) создана установка для исследования МТМ в широком диапазоне переменных магнитных полей на частотах 50, 400, 500 и 1000 гц [1]. Принцип ее работы тот же, что и установки ВНИИЭМ. При проектировании отдельных блоков были учтены изложенные выше требования.

Особенностью силовой части является применение коаксиального пермеметра сильных полей (рис. 2). Его намагничивающий стержень 2 укреплен на дне полого цилиндра из меди или латуни со съемной верхней крышкой 1. Это вторичный (короткозамкнутый) виток силового торои-

дального трансформатора 5, находящегося внутри цилиндра. Конструкция пермеаметра, разработанная в МЭИ, позволяет создавать в намагничивающем стержне токи порядка нескольких килоампер частотой до 1000 гц. Известные ранее коаксиальные пермеаметры предназначались лишь для малых токов в широком диапазоне частот [2, 3]. Данный пермеаметр имеет и другие достоинства: практически отсутствуют искажения плоскопараллельного поля стержня; значительно уменьшены размеры прибора, активное сопротивление и индуктивность намагничивающего

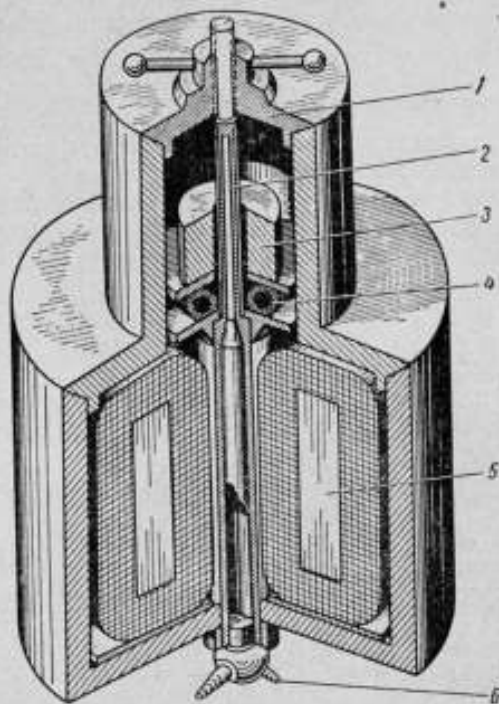


Рис. 2. Устройство коаксиального пермеаметра сильных полей.

1 — съемная верхняя крышка; 2 — намагничивающий стержень; 3 — образец; 4 — катушка взаимной индуктивности; 5 — торцевой трансформатор; 6 — канал водяного охлаждения.

витка; отсутствует магнитное поле вокруг пермеаметра (в конструкциях с прямоугольным витком оно служит источником наводок на измерительную часть установки). Охлаждается стержень проточной водой, подаваемой через специальный канал 6. В дальнейшем предусмотрена модификация конструкции пермеаметра с полым намагничивающим стержнем, в котором находится дополнительный провод постоянного тока или тока другой частоты.

Силовая часть содержит также устройство для поддержания в образце 3 режима синусоидальной индукции или напряженности поля.

Главная особенность измерительной части установки МЭИ по сравнению с установкой ВНИИЭМ состоит в том, что в последовательной цепи ваттметра трансформатор ТТ (рис. 1) заменен градуированным электронным усилителем, подключенным к вторичной обмотке катушки М. Усилитель не только повышает, но и интегрирует входной сигнал, так

как э. д. с. в обмотке пропорциональна производной намагничивающего тока. Усилители в последовательной и параллельной цепях ваттметра выполнены избирательными: первая гармоника сигнала проходит через них без искажений и в нужной фазе, остальные гармоники подавляются. Это упрощает выполнение электронных блоков и облегчает режим работы малокоэффициентного ваттметра при резко искаженной форме сигнала.

В 1964—1965 гг. во ВНИИМ разработана установка для испытания МТМ в широком диапазоне переменных магнитных полей, в основу которой положены методы ваттметра и феррометра. Намагничивание образца осуществляется витком прямоугольной формы. В установке применен ваттметр типа Ф-518/1 с трансформатором тока, фазовая погрешность которого не более 1'. Для получения точек динамических петель на частоте 50 гц используют управляемый механический выпрямитель феррометра типа У-542.

В ряде организаций МТМ исследуют в переменном поле различных частот методом феррографа, при этом наблюдают (или фотографируют) динамические петли на экране электронно-лучевой трубки. Конструкция намагничивающего устройства в большинстве случаев одновитковая прямоугольной формы.

Во вращающихся полях МТМ испытывают в настоящее время на макетах гистерезисной машины [4]. При этом не обеспечивается требуемая точность измерения, а также не соблюдается однородность намагничивания образца. Поэтому результаты испытаний следует рассматривать как ориентировочные.

### Выводы и предложения

Из рассмотренных методов наибольшую точность измерения характеристик  $p_{г.н} = F(B_m)$  и  $H_m = F(B_m)$  в широком диапазоне напряженностей поля обеспечивает метод амперметра, вольтметра и ваттметра; погрешность измерения  $p_{г.н}$  здесь составляет не более  $\pm 5\%$ , а  $B_m$  и  $H_m$  — порядка  $\pm (1,5-2,5)\%$ . Планиметрирование площади динамической петли при использовании феррометра или феррографа для определения удельных потерь на гистерезис и вихревые токи вызывает погрешности, намного превышающие погрешности измерения ваттметром.

При приемо-сдаточных испытаниях МТМ характеристики  $p_{г.н} = F(B_m)$  и  $H_m = F(B_m)$  следует измерять методом амперметра, вольтметра и ваттметра. Этот метод может быть использован также для контроля технологического процесса изготовления МТМ.

В методическую часть проекта стандарта на магнитотвердые материалы для роторов гистерезисных двигателей можно рекомендовать включить установку ВНИИЭМ или МЭИ.

Для испытаний МТМ в переменном поле необходимо наладить в ближайшее время серийное производство: одновитковых намагничивающих устройств, обеспечивающих большие намагничивающие токи частотой 50, 400, 500 и 1000 гц, с приспособлением для поддержания основных режимов намагничивания; милливольтметров средних значений с расширенным диапазоном частот; электродинамических ваттметров с усилительными каскадами, предназначенных для работы с одновитковыми намагничивающими устройствами.

Для исследований МТМ в научных лабораториях следует рекомендовать также выпуск феррографов с линейным и стробоскопическим преобразователями и двухканальных феррометров с двухкоординатным самописцем. Эта аппаратура должна работать с одновитковыми намагничивающими устройствами.

Необходимо создать в ближайшее время аппаратуру для исследования и контроля МТМ во вращающемся магнитном поле. Предварительно должна быть разработана единая методика испытания и установлены магнитные характеристики.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Подольский И. Д. Установка для испытания магнитножестких материалов в переменном поле при повышенных частотах. Сб. докладов Научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ за 1964—1965 гг. МЭИ, 1965.
2. Kelsall G. Permeameter for alternating current measurements at small magnetizing forces. «J. Opt. Soc. Am. and Rev. Sci. Instrum.» 1924, № 8.
3. Мушкарден Э. М., Шевцов Г. А. Прибор для измерения магнитной проницаемости ферритов в диапазоне радиочастот. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
4. Горжевский И. И. Исследование характеристик магнитотвердых материалов при эллиптическом перемагничивании. «Электромеханика и автоматика», 1958, № 1.

### АППАРАТУРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИТЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В МАССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В нашей стране для удовлетворения потребностей народного хозяйства в постоянных магнитах созданы специализированные предприятия по их производству. Однако техническая оснащенность этих предприятий еще не удовлетворяет современным требованиям в отношении оценки качества продукции и контроля технологических процессов. Этим в значительной мере объясняется разброс магнитных свойств изготавливаемых магнитов как между плавками, так и внутри одной плавки, что вызывает необходимость стопроцентного контроля готовой продукции. Однако из-за большой трудоемкости такой контроль осуществляется только для магнитов особо ответственных типов; магниты же массового производства контролируют выборочно.

Согласно ГОСТ 9575—60 магнитные свойства постоянных магнитов следует проверять по остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силе  $H_c$  и максимальной магнитной энергии. Магниты, форма которых не допускает измерения  $B_r$  и  $H_c$ , контролируют по остаточному магнитному потоку или магнитному моменту. Эти характеристики следует определять на баллистической установке веберметром и коэрцитиметром.

Если остаточную индукцию и коэрцитивную силу измерять сравнительно легко, то для определения магнитной энергии необходимо снимать размагничивающую кривую предельного гистерезисного цикла с последующей математической и графической обработкой результатов. Из-за большой трудоемкости этих операций при массовом производстве постоянные магниты не контролируют по максимальной энергии. Ее определяют выборочно для обработанных магнитов простой формы и образцов, вырезанных из магнитов сложной формы. Однако таких магнитов немного. В основном же контролируют остаточную индукцию, коэрцитивную силу и остаточный магнитный поток; форма размагничивающей кривой остается неизвестной.

На Новочеркасском заводе постоянных магнитов используют следующую аппаратуру для контроля различных типов постоянных магнитов (в процентах):

милливеберметр М-119 . . . . .	92,0
установка БУ-3 . . . . .	5,0
измеритель магнитной индукции ИМИ-3 . . . . .	1,2
различные приспособления . . . . .	1,8

Необходимо отметить, что для 45% типов магнитов определяют  $B_r$  и  $H_c$ , а для 40% — магнитный поток, и только магниты одного типа контролируют по магнитному моменту.

Рассмотрим приборы, на которых определяют указанные в стандарте величины.

Магнитный поток большей частью измеряют веберметрами типа М-119 и М-199, а также фотокомпенсационными микровеберметрами типа Ф-18. Кроме веберметров, применяемых для массового контроля магнитных характеристик, в лабораторной практике широко используют баллистические установки. В настоящее время промышленность выпускает установки типа БУ-3 (взамен ранее выпускаемой У-541), предназначенные для испытания в лабораторных условиях как магнитотвердых, так и магнитномягких материалов. Нам представляется нецелесообразным такое сочетание, поскольку приспособления для испытания магнитномягких материалов на предприятиях, изготавливающих магнитотвердые материалы, не используют. Установка БУ-3 снабжена соленоидом, позволяющим создавать напряженность поля до  $56 \text{ кА/м}$ . Однако применение в ней баллистического гальванометра делает ее непригодной для работы в цеховых условиях.

Величину  $H_c$  в большинстве случаев определяют коэрцитиметрами, которые чаще всего изготавливаются предприятиями, контролирующими магниты. Для массового контроля магнитов промышленность не выпускает коэрцитиметры. Необходимы коэрцитиметры различных конструкций как для низкокоэрцитивных (до  $9,6 \text{ кА/м}$ ), так и для высококоэрцитивных (до  $88 \text{ кА/м}$ ) сплавов. Перспективно в этом отношении применение преобразователей Холла, которые широко используют в последнее время в магнитоизмерительной аппаратуре СССР и за рубежом. Отечественная промышленность серийно выпускает измерители магнитной индукции типа ИМИ-3 с преобразователями Холла. Однако из-за сравнительно больших габаритов последних приборы ИМИ-3 не нашли широкого применения для контроля постоянных магнитов. Очевидно, конструкцию ИМИ-3 следует модифицировать согласно с потребностями заводов, изготавливающих магниты, уменьшив в первую очередь габариты преобразователей Холла.

Некоторые отечественные лаборатории имеют приборы с малогабаритными преобразователями, например измеритель магнитной индукции, предназначенный для магнитных систем с зазором  $0,8 \text{ мм}$ , с погрешностью измерения до  $0,3 \text{ тл}$ . Его погрешность, по данным авторов, не превышает  $\pm 2\%$  [1]. Кроме того, известна конструкция прибора типа М-2 для измерения остаточной индукции магнитов кольцеобразной формы в пределах до  $0,2 \text{ тл}$ ; здесь размеры преобразователя Холла  $5 \times 3 \times 0,5 \text{ мм}$ . Аналогичная аппаратура создана и за рубежом [2, 3].

Помимо приборов непосредственной оценки на специализированных заводах применяют установки с преобразователями Холла, основанные на методе сравнения. Так, на Новочеркасском заводе постоянных магнитов длительное время магниты контролируют на установке с дифференциальной магнитной системой, сравнивая остаточные потоки испытуемого и образцового магнитов [4]. Установка снабжена электронным усилителем, на выходе которого включен магнитоэлектрический измеритель. По отклонению стрелки последнего судят о том, насколько испытуемый магнит сильнее или слабее образцового.

Заводы, изготавливающие постоянные магниты, содержат довольно большой штат ОТК, который не всегда справляется с поставленными задачами. Назрела необходимость создания для массового контроля постоянных магнитов полуавтоматических и автоматических устройств. В Новочеркасском политехническом институте, например, уже разработана конструкция автоматов для массовой разбраковки постоянных магнитов [5]. Принцип действия этих автоматов основан на сравнении магнитных потоков на рабочих участках кривых размагничивания испытуемого и образ-

цового магнитов. Производительность автомата — порядка 1200—1500 магнитов в час, что заменяет труд 8—10 контролеров, работающих с обычной аппаратурой.

В настоящее время крайне необходимы автоматы для разбраковки цилиндрических магнитов различных размеров, текстурованных по диаметру, с производительностью до 1500 магнитов в час и погрешностью не более  $\pm 5\%$ , а также для разбраковки подковообразных и многополюсных магнитов. Нам представляется, что автоматы следует разрабатывать только для контроля массового выпуска магнитов. Для магнитов же, изготавливаемых небольшими партиями, целесообразнее создавать полуавтоматические устройства с автоматизированным лишь процессом измерения. Такие устройства должны быть простыми по конструкции и небольших габаритов. Они должны разбраковывать магниты нескольких типов, для чего следует предусмотреть смену и настройку некоторых узлов.

На Новочеркасском заводе применяют также установку, основанную на осциллографическом методе контроля [6]. Испытуемый магнит сравнивают с образцовым или непосредственно определяют остаточную индукцию и коэрцитивную силу, а также индукцию и напряженность поля в любой заданной точке размагничивающей кривой. Партии магнитов снабжают значениями предельной кривой гистерезисного цикла. По сравнению с баллистическим методом здесь время, затрачиваемое на измерение магнитных характеристик, будет в десять раз меньше.

На данной установке производят и массовую разбраковку магнитов, в частности магнитов с направленной кристаллизацией. Это первая установка в стране, которая позволяет вести контроль по предельной кривой гистерезисного цикла. Исследования показали, что осциллографическим методом можно получить не всю кривую, а только размагничивающую ее часть. Отсчет значений индукции и напряженности поля можно вести по стрелочным приборам, используя осциллограф как индикатор для определения момента компенсации. Такие установки целесообразно применять в цеховой и лабораторной практике.

В дальнейшем необходимо создавать установки для контроля остаточной индукции, коэрцитивной силы и максимальной магнитной энергии магнитов как больших, так и малых размеров (длиной 15—20 мм, сечением 0,8—1,0 см<sup>2</sup>) с погрешностью не более  $\pm 3\%$ , а также установки с непосредственным отсчетом измеряемых характеристик по приборам. Перспективно применение цифрового отсчета в измерительной аппаратуре для контроля характеристик как готовых магнитов, так и в процессе их изготовления.

Постоянные магниты можно выпускать с заданными параметрами при условии точного соблюдения технологического процесса. Правда, в настоящее время осуществить это довольно сложно из-за недостаточного контроля технологического режима массового их производства. Некоторые предприятия выпускают, например, постоянные магниты с энергией до 24 кдж, однако применить их технологию на других заводах практически невозможно ввиду отсутствия соответствующих устройств для контроля. Поэтому большую часть магнитов в СССР изготавливают с энергией до 14 кдж. Устройства для контроля необходимо разрабатывать с учетом последующей автоматизации процессов производства постоянных магнитов.

Итак, на основании изложенного выше можно рекомендовать:

1. Продолжить выпуск установок БУ-3, милливеберметров М-119, микровеберметров Ф-18 и М-199 (значительно увеличив выпуск последних), а также измерителей магнитной индукции ИМИ-3.



2. Освоить в ближайшее время промышленное производство коэрцитивметров для низко- и высококоэрцитивных сплавов и, в частности, приборов с преобразователями Холла.

3. Разработать и освоить промышленный выпуск установок с малогабаритными преобразователями Холла, снабженных соответствующими усилителями.

4. Создать установку для непосредственного определения магнитных характеристик постоянных магнитов сложной формы, аппаратуру для контроля максимальной магнитной энергии при массовом производстве постоянных магнитов, а также автоматы для разбраковки цилиндрических магнитов, текстурованных по диаметру, подковообразных и многополюсных (4-, 6-, 8- и 12-полюсных) производительностью соответственно 1500, 500 и 300 магнитов в час, с погрешностью  $\pm 5\%$ .

5. Освоить промышленный выпуск установок для получения на экране осциллографа петли гистерезиса постоянного магнита правильной формы, которые могли бы измерять магнитную индукцию и напряженность поля в любой точке петли, и с отсчетом их значений по стрелочным приборам.

6. Изучить возможности применения осциллографического метода оценки магнитных характеристик магнитов сложной формы, а также возможности получения на экране осциллографа размагничивающей части кривой предельной петли гистерезиса.

7. Разработать магнитоизмерительную аппаратуру с цифровым отсчетом и печатающим устройством.

8. Исследовать магниты различной конфигурации.

9. Дать оценку характеристик магнитов сложной формы при их измерении в разомкнутой цепи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таранов С. Г., Февралева Н. Е. Измеритель магнитной индукции, основанный на эффекте Холла. «Измерительная техника», 1960, № 52.
2. Electronics Design, 1961, № 23.
3. Electronics, 1960, v. 33, № 37.
4. Пеккер И. И., Журавлева Т. С. Применение дифференциальной схемы включения полупроводниковых датчиков э. д. с. Холла для промышленного контроля постоянных магнитов. «Электромеханика», 1958, № 10.
5. Пеккер И. И., Доманов А. Д., Шмойлов Н. Ф., Комов А. Н. Автомат для разбраковки постоянных магнитов по магнитным свойствам. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
6. Маркин П. П. Электронное устройство ферротестера для испытания постоянных магнитов. «Известия высших учебных заведений», электромеханика, 1962, № 4.

### АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Аппаратура, предназначенная для испытания магнитотвердых материалов, должна обеспечивать отсчет по показывающим приборам остаточной индукции  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_c$ , а также индукции  $B_d$  и напряженности поля  $H_d$ , соответствующих максимальной энергии  $\left(\frac{BH}{2}\right)_m$ , и других точек кривых размагничивания и возврата с записью этих кривых.

Большую часть указанных характеристик определяют в замкнутой магнитной цепи. Иногда свойства материала контролируют по одному параметру, например по  $H_c$ ; для этой цели применяют устройства с разомкнутой магнитной цепью — коэрцитиметры. Во многих случаях требуется контролировать свойства магнитных материалов с учетом геометрических размеров магнита в готовых изделиях. Такие испытания производят чаще всего в разомкнутой магнитной цепи.

Основной характеристикой при испытании постоянных магнитов является магнитная индукция в рабочем пространстве магнитной системы. Для отбраковки магнитов различной формы и контроля их по величине потока на заводах широко применяют нестандартную аппаратуру, в основу работы которой положены импульсно-индукционный метод и метод взаимодействия двух магнитных полей [1].

Для измерения магнитного потока промышленность выпускает веберметры М-119 и М-199, а также приборы с фотоэлектрическими усилителями Ф-18 и Ф-190. Индукцию магнитных систем определяют широко распространенными приборами, основанными на использовании эффекта Холла [2—4]. Для этой же цели служит измеритель магнитной индукции ИМИ-3, который может работать при температуре  $(-30) \div (+50)^\circ\text{C}$  благодаря температурной стабилизации. Недостатком его являются сравнительно большие размеры зонда.

В настоящее время промышленность еще серийно не выпускает приборы, измеряющие индукцию в зазорах 0,8—1 мм.

До последнего времени магнитотвердые материалы испытывали импульсно-индукционным методом измерения индукции  $B$  и напряженности поля  $H$  (например, установка БУ-3). С появлением высококоэрцитивных материалов возникла необходимость значительно увеличить намагничивающую силу до значения, достаточного для их насыщения. В связи с этим начали применять импульсное намагничивание. Размагничивающее

поле в данном случае создается катушками, питающимися от источника постоянного тока [5].

Магнитотвердые материалы исследуют также непрерывно-индукционным методом: измеряют э. д. с., наведенную во вращающейся измерительной катушке при неизменном поле либо в неподвижной катушке при медленном изменении напряженности поля [6]. Этот метод дает возможность записать всю петлю гистерезиса и автоматизировать процесс измерения. Однако применение импульсного намагничивания в данном случае затруднительно. Чтобы получить напряженность поля, необходимую для насыщения высококоэрцитивных материалов, следует либо значительно увеличить размеры намагничивающих катушек, либо использовать магнитопровод специальной формы (например, формы сдвоенного яра, предложенной Нейманом). Усложнение формы магнитопровода приводит к увеличению его объема и неудобству установки образцов при испытании.

Наибольшую точность измерения магнитной индукции дает индукционный метод, при котором измерительную обмотку наносят непосредственно на испытуемый образец. Этот метод целесообразно использовать в области метрологии и при точных лабораторных измерениях. Другие методы измерения позволяют плавно изменять размагничивающий ток и определять индукцию по установившимся показаниям приборов, однако погрешность измерения  $B$  здесь будет больше, чем при индукционном методе, так как измеритель индукции  $B$  находится вне образца. В связи с этим необходимо градуировать аппаратуру посредством образцов с известными характеристиками. Основной погрешностью является здесь погрешность за счет нарушения пропорциональности между магнитными потоками в образце и месте его измерения. Нарушение пропорциональности вызывается главным образом потоками рассеяния намагничивающих катушек, утечками потока образца и наличием остаточной намагниченности материала магнитопровода. Действие на измеритель  $B$  потока намагничивающих катушек  $\Phi_{н.к}$  можно устранить компенсацией его противоположно направленным потоком дополнительных катушек  $\Phi_{к.к}$ .

Установка для испытания магнитотвердых материалов, схема магнитной цепи которой представлена на рис. 1, имеет три источника намагничивающей силы: намагничивающие ( $I_1\omega_1$ ) и компенсирующие ( $I_2\omega_2$ ) катушки и испытуемый магнит ( $Jl$ , где  $J$  — намагниченность образца;  $l$  — его длина). Измеритель  $H$  установлен у поверхности магнита, а измеритель  $B$  — в воздушном зазоре; магнитное сопротивление зазора  $R_{мз}$ , магнитопровода  $R_{м}$ . Так как магнитный поток намагничивающих катушек  $\Phi_{н.к}$  в месте, где находится измеритель  $B$ , равен и противоположен по направлению потоку компенсирующих катушек  $\Phi_{к.к}$ , через этот прибор проходит только поток испытуемого магнита  $\Phi_0$ . Влияние же на измеритель  $B$  потока  $\Phi_{н.к}$  устраняют коррекцией — воздействием какой-либо электрической величины, пропорциональной  $\Phi_{н.к}$ .

На рис. 2 приведена схема магнитной цепи установки с магнитопроводом мостового типа, который позволяет выделить поток образца. При полной симметрии намагничивающих катушек и магнитопровода  $\Phi_{н.к}$  не проходит по перемычке, в воздушном зазоре которой находится измеритель индукции. Изменение длины испытуемого магнита в таких установках

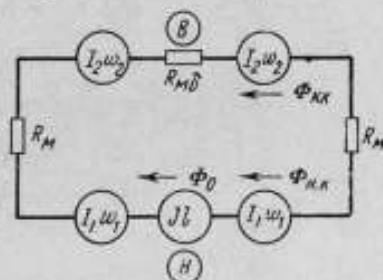


Рис. 1. Схема магнитной цепи установки с компенсирующими катушками.

требует перемещения обеих половин магнитопровода, что в заводских условиях сложно в конструктивном и эксплуатационном отношении.

При разработке установок для испытания магнитотвердых материалов предварительно следует выбрать:

- форму магнитопровода;
- способ получения намагничивающей силы для насыщения высококоэрцитивных материалов;
- методы определения индукции и напряженности поля;
- местонахождение измерителей индукции и напряженности поля.

Выбирая принцип действия и конструкцию установки для испытания в лабораторных условиях, надо учитывать, измеряются ли единичные образцы или же проводятся массовые испытания образцов и магнитов. Если необходима запись всей петли гистерезиса, целесообразно применять непрерывно-индукционный метод измерения индукции и напряженности

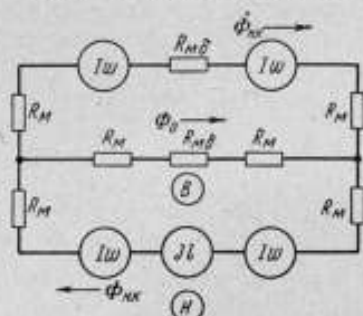


Рис. 2. Схема магнитной цепи установки с магнитопроводом мостового типа.

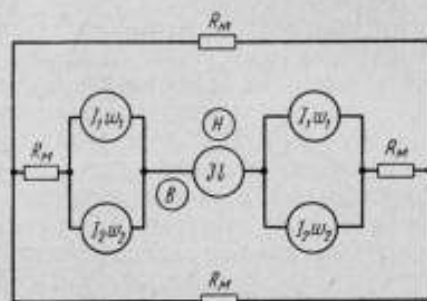


Рис. 3. Схема магнитной цепи установки с импульсным намагничиванием.

поля. Однако запись полной петли исключает возможность импульсного намагничивания и приводит к усложнению аппаратуры.

При разработке установок для заводских лабораторий и цехов должны быть также разрешены вопросы автоматизации процесса измерения и механизации подачи образцов. В данном случае наиболее рациональной формой магнитопровода является форма ярма, предложенная Нейманом. Применение импульсного намагничивания магнитотвердых материалов до их насыщения дает возможность перейти и к более простой форме ярма, удобной для автоматической подачи испытуемых образцов. Для получения точек размагничивающей кривой должна быть предусмотрена дополнительная обмотка, питающаяся от источника постоянного тока. Индукцию и напряженность поля следует измерять методом, основанным на действии магнитных полей на физические свойства материала, в частности на эффекте Холла. Измеритель индукции целесообразно поместить в полюсный башмак магнитопровода. При этом должно быть компенсировано влияние на прибор потока размагничивающих катушек, а также произведена коррекция, учитывающая сечение и длину образца. Измеритель напряженности поля должен находиться у поверхности образца, в нейтральном его сечении.

На рис. 3 представлена схема магнитной цепи установки, в которой учтены приведенные выше рекомендации. Образец намагничивается импульсом тока  $I_1$ , протекающего по катушкам  $W_1$ , а размагничивается током  $I_2$  от постоянного источника, питающего катушки  $W_2$ . Измеритель индукции (преобразователь Холла) находится вблизи образца, в узком воздушном зазоре; измеритель напряженности поля — у его поверхности.

В настоящее время остро ощущается потребность в коэрцитиметрах для контроля магнитных свойств материалов по одному параметру. Создание намагничивающей силы для насыщения высококоэрцитивных материалов в разомкнутой магнитной цепи обуславливает большие габариты намагничивающих катушек. Намагничивание испытуемых материалов электромагнитом, а затем определение их коэрцитивной силы коэрцитиметром приводит к большой потере времени. Более целесообразно применять в разомкнутой цепи импульсное намагничивание.

Размеры размагничивающей обмотки могут быть уменьшены в неполностью замкнутой цепи. В этом случае испытуемый образец помещают в воздушный зазор магнитопровода из магнитномягкого материала, на котором находятся намагничивающие и размагничивающие катушки. Величину зазора выбирают такой, чтобы при помещении в него самого длинного образца между магнитопроводом и образцом оставался воздушный промежуток. Габариты коэрцитиметра такой конструкции (рис. 4) уменьшены, и упрощена автоматизация подачи образцов при испытании. Рационально применение в коэрцитиметре в качестве чувствительного элемента преобразователей Холла для определения намагниченности образца и измерения напряженности размагничивающего поля.

Как видно из схемы магнитной цепи (рис. 4), испытуемый магнит отдален от магнитопровода воздушными зазорами  $R_{\text{мб}}$ . Преобразователем Холла  $\Pi_1$ , расположенным у края магнита параллельно его плоскости, измеряют намагниченность магнита, а преобразователем  $\Pi_2$ , установленным в нейтральном сечении магнита перпендикулярно к его плоскости, — напряженность поля.

В дальнейшем необходимо также создать аппаратуру для определения размагничивающей части предельной петли гистерезиса и кривых возврата в широком интервале температур:  $(-180) \div (+550)^\circ \text{C}$ . Желательно, чтобы эта аппаратура позволяла контролировать удельную энергию. Определение размагничивающей части петли гистерезиса в таком диапазоне связано с некоторыми трудностями: помещение образца, измерительных устройств и части магнитопровода в среду с высокой температурой — сложная задача; помещение же только образца в температурную камеру приводит к разрыву магнитопровода. В данном случае можно рекомендовать относительные измерения указанных характеристик либо на одном и том же образце, помещенном сначала в среду с нормальной температурой, а затем с повышенной, либо одновременно на двух идентичных образцах дифференциальным методом. К подобной аппаратуре должны быть предъявлены повышенные требования в отношении точности, так как в интервале температур  $(-180) \div (+550)^\circ \text{C}$  магнитные характеристики могут изменяться в пределах точности измерения самих установок.

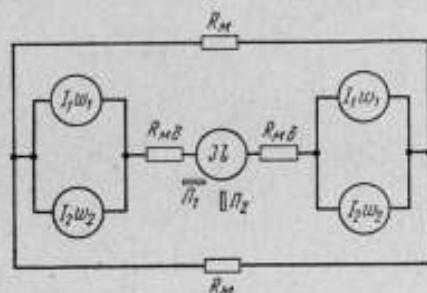


Рис. 4. Схема магнитной цепи коэрцитиметра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нестеренко А. Д., Февралева Н. Е. К терминологии в области магнитных измерений. «Труды Института электродинамики АН УССР». Киев, Изд. АН УССР, 1964.

2. Воейков А. А. Конструирование гауссметров повышенной точности, использующих явление Холла. Автореферат диссертации. ЛИАП, 1960.

3. Витковский В. Ф., Соколова Е. А. Электронный гауссметр типа ЭГ-1, основанный на использовании эффекта Холла. «Труды институтов Комитета», вып. 72 (132). М.—Л., Стандартгиз, 1963.

4. Таранов С. Г., Февралева Н. Е. Измеритель напряженности магнитного поля, основанный на эффекте Холла. «Измерительная техника», 1960, № 2.

5. Ягола Г. К., Зингерман В. И., Гротовицкий М. И., Сепетый В. Н. Методика испытания образцов магнитотвердых материалов при импульсном намагничивании. «Измерительная техника», 1965, № 1.

6. Маркин П. П., Пеккер И. И. Ферротестер для постоянных магнитов. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.

### УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ И НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В ЛЮБОЙ ТОЧКЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Осциллографический метод испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов при их периодическом перемагничивании, предложенный несколько лет назад, позволяет получать при минимальной затрате труда и времени предельную петлю гистерезиса [1]. Наряду с достоинствами этот метод имеет и существенный недостаток — большую погрешность измерения (не ниже  $\pm 7\%$ ), основную долю которой составляет погрешность отсчета.

В предлагаемой установке (рис. 1) погрешность отсчета сведена к минимуму благодаря методу замещения измеряемой величины известной, контролируемой стрелочным магнитоэлектрическим прибором. Момент компенсации отмечается на экране электронно-лучевого индикатора типа И-4М, с помощью которого можно увеличить размер получаемой петли гистерезиса и повысить точность измерения. При использовании в установке интеграторов для каналов индукции  $B$  и напряженности поля  $H$  отпадает необходимость в сложных усилителях постоянного тока после интегрирования и уменьшается постоянная измерительной катушки напряженности поля  $K_H$ , а также количество витков катушки индукции в два раза. Это облегчает выполнение последней и дает возможность уменьшить размеры катушки напряженности поля, особенно ее толщину. Погрешность измерения  $H$  уменьшается с приближением катушки к поверхности образца.

Блок-схема установки (рис. 1) включает в себя намагничивающее и измерительное устройства, а также индикатор. Намагничивающее устройство состоит из пермеаметра  $\Pi$ , задающего генератора  $ЗГ$  и переключательного устройства  $ПУ$ ; последние два позволяют изменять в пермеамetre направление тока частотой 1 гц. Лучшие результаты получены при испытании в установке пермеаметра с двойным ярмом. Измерительное устройство содержит два одинаковых по схеме интегратора индукции  $ИВ$  и напряженности поля  $ИН$ , источники постоянных напряжений  $E_1$  и  $E_2$ , регулируемых реостатами  $R_1$  и  $R_2$  и контролируемых вольтметрами  $V_B$  и  $V_H$ , и пр.

Принцип действия установки состоит в следующем. На испытуемый магнит наматывают витки измерительной катушки индукции  $W_B$ , число которых определяют по отношению  $\frac{K_B}{S}$  ( $K_B$  — постоянная катушки индукции, равная 600;  $S$  — площадь сечения магнита,  $см^2$ ). Сверху на

образец кладут плоскую катушку напряженности поля  $W_H$ . При измерении переключатели  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  устанавливают в положение 1 и на экране фиксируют петлю гистерезиса. Затем  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  переводят в положение 2 и на входы индикатора подают постоянные напряжения. Регулируя эти напряжения реостатами  $R_1$  и  $R_2$ , луч индикатора совмещают с выбранной точкой петли

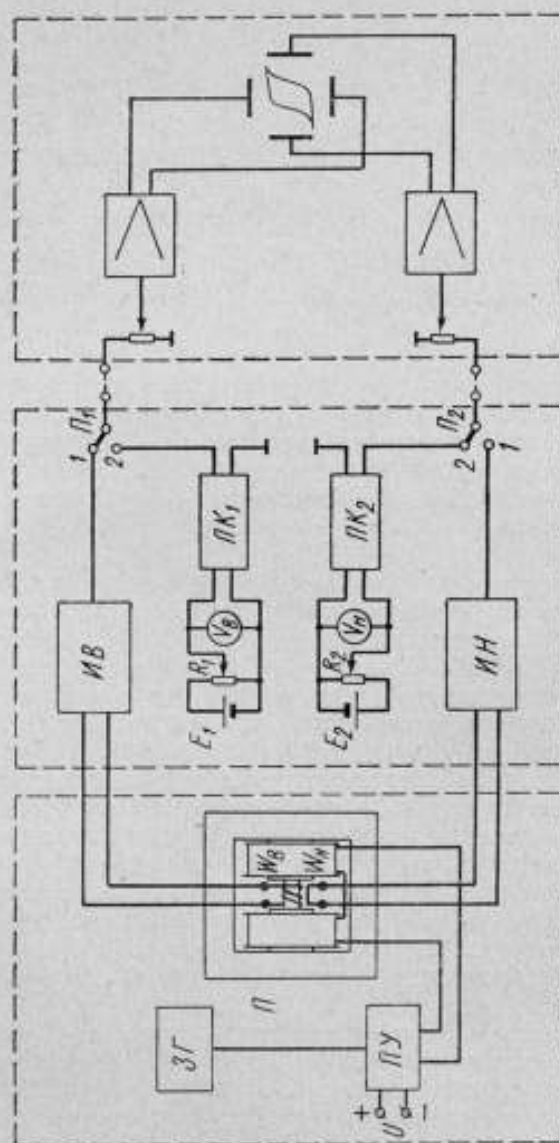


Рис. 1. Блок-схема установки.

гистерезиса. Изображение петли сохраняется при таком переключении за счет длительного времени послесвечения люминофора трубки, которое для индикатора типа И-4М составляет 20 сек при средней освещенности помещения. Отсчет  $H$  и  $B$  в данной точке производят по шкалам вольтметров  $V_B$  и  $V_H$ , градуированных непосредственно в единицах индукции



и напряженности поля. Отклонение луча по вертикали в установке прямо пропорционально  $B$ , а по горизонтали  $H$ .

Так как на каждый образец приходится наматывать витки катушки индукции, то желательно иметь минимальное число витков. На основании этих соображений была выбрана постоянная  $K_B = 600 \text{ см}^2$ . В катушке же напряженности поля, наоборот, следует стремиться к увеличению постоянной  $K_H$  при малых размерах катушки. В данном случае  $K_H = 4000 \text{ см}^2$ .

Передаточные коэффициенты индукции  $A_B = 139$  и напряженности поля  $A_H = 249$  определены исходя из заданных значений чувствительности индикатора  $s_X = s_Y = 8 \text{ мм/в}$  по осям  $X$  и  $Y$ , наибольших отклонений луча  $y_m = x_m = 100 \text{ мм}$  и выбранных значений  $B_m = 1,5 \text{ тл}$  и  $H_m = 100 \text{ ка/м}$ . Ввиду больших коэффициентов  $A_B$  и  $A_H$  к интеграторам предъявляют высокие требования, так как погрешность интегрирования, вызванная дрейфом нуля усилителей постоянного тока, может оказаться значительной.

После того как луч вычертит на экране несколько контуров петли гистерезиса, индикатор переключают на два источника  $E_1$  и  $E_2$  постоянных напряжений  $U_X$  и  $U_Y$ , значения которых регулируют. Отклонения луча индикатора можно представить в виде  $y_2 = s_Y U_Y$  и  $x_2 = s_X U_X$  (переключатель  $\Pi_2$  находится в положении 2).

Если  $U_X$  и  $U_Y$  будут такими, что луч на экране совместится с выбранной точкой петли гистерезиса, то по этим величинам можно судить об индукции и напряженности поля в той же точке. В данном случае  $y_1 = y_2$  и  $x_1 = x_2$  (переключатель  $\Pi_1$  находится в положении 1). Следовательно,

$$s_Y U_Y = s_Y K_B A_B B;$$

$$s_X U_X = s_X K_H A_H \mu_0 H$$

или

$$U_Y = c_1 B; \quad U_X = c_2 H,$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  
 $c_1$  и  $c_2$  — коэффициенты пропорциональности соответственно между  $B$  и  $U_Y$  и между  $H$  и  $U_X$ ;

$$c_1 = K_B A_B; \quad c_2 = K_H A_H.$$

Значения  $U_X$  и  $U_Y$  контролируют вольтметрами  $V_H$  и  $V_B$ .

Метод замещения, используемый при получении изображения на экране индикатора, позволяет избежать погрешности из-за нелинейности индикатора и сохранить градуировку прибора при изменении масштаба петли на экране.

Измерительное устройство снабжено переключателями квадрантов  $\Pi K_1$  и  $\Pi K_2$ , посредством которых можно изменять знак подаваемых на индикатор известных напряжений. При определении магнитных характеристик образцов в первом квадранте петли гистерезиса переключатель  $\Pi_2$  устанавливают в положение 1, во втором — в положение 2 и т. д. Наличие  $\Pi_2$  дает возможность расширить область применения установки (например, ее используют для измерения основной кривой намагничивания).

Как указывалось выше, индукцию и напряженность поля определяют при отключенных интеграторах от индикатора по петле гистерезиса, оставшейся на экране вследствие послесвечения люминофора трубки. Если оператор не успеет произвести измерения или если их необходимо повторить, то он вновь включает интеграторы и получает петлю гистерезиса, а затем продолжает измерения. Для удобства в схему измерительного устройства (рис. 2) введен автоматический переключатель, посредством которого периодически получают на экране индикатора изображение петли

и светящееся пятно, совмещенное с выбранной точкой на оставшемся следе петли. Этот переключатель (его период выбран равным 7 сек) представляет собой мультивибратор, собранный на лампе  $\Lambda_1$ . Опыт работы на установке показал, что за 7 сек оператор средней квалификации вполне успевает измерить напряженность поля и индукцию в заданной точке. Для получения

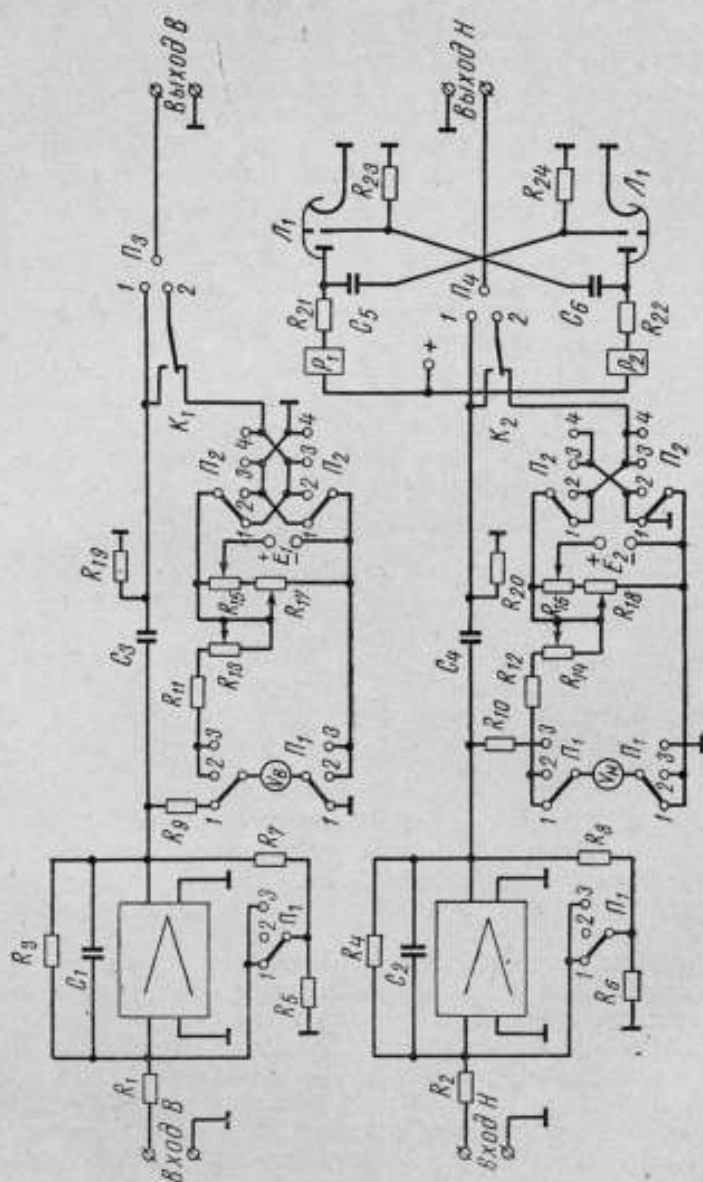


Рис. 2. Принципиальная схема измерительного устройства.

только петли гистерезиса, например при фотографировании, автоматический переключатель отключается тумблерами  $\Pi_3$  и  $\Pi_4$ .

Для интегрирования э. д. с. измерительных катушек применены два интегратора, действующих по принципу усилителей постоянного тока с отрицательной обратной связью. Их особенностью является малая зави-

симось коэффициента передачи от коэффициента усиления (достаточно большой величины) усилителя постоянного тока. Подобные интеграторы широко используют в аналоговых вычислительных машинах [2, 3].

Усилитель имеет четыре каскада (рис. 3). Первый из них построен по последовательной балансной схеме на лампе  $L_1$  (выбор лампы обуслов-

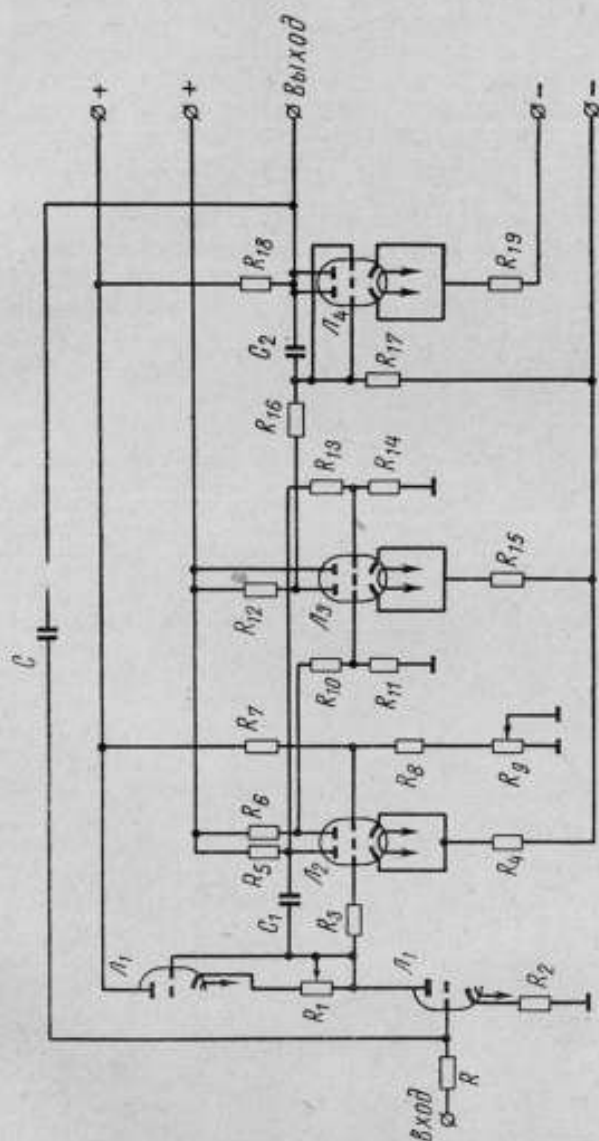


Рис. 3. Принципиальная схема интегрирующего усилителя.

лен малым сеточным током); второй — по параллельной схеме, на лампе  $L_2$ . Для согласования симметричных выходов первого и второго каскадов с четвертым служит третий каскад на лампе  $L_3$ . Четвертый каскад выполнен на лампе  $L_4$ , оба его триода включены параллельно. Коэффициент усиления прибора составляет около 80 000; дрейф нуля, приведенный

к входу усилителя, 1 мв·ч. Коэффициенты передачи сообразованы с постоянными измерительных катушек и входным напряжением индикатора, необходимым для получения отклонения луча на весь экран.

Для уменьшения погрешности усилителя от дрейфа нуля приняты следующие меры. Во-первых, между выходом интегратора и входом индикатора включена разделительная емкость  $C$  такой величины, чтобы она мало сказывалась на погрешности интегрирования. Во-вторых, интегрирующий конденсатор зашунтирован сравнительно большим (около 30 Мом) сопротивлением, которое препятствует накоплению заряда на конденсаторе за счет дрейфа нуля. В то же время это сопротивление мало сказывается на погрешности интегрирования. В-третьих, перед каждым измерением реостатом  $R$  устанавливают нуль усилителя постоянного тока, контролируемый по шкалам вольтметров. Погрешность интегрирования сигнала около  $\pm 1,5\%$ .

Результаты исследования показали, что погрешности измерений индукции и напряженности поля образцов магнитотвердых материалов и постоянных магнитов из них на данной установке отличаются от погрешностей измерений тех же величин на баллистической установке не более, чем на  $\pm 5\%$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Маркин П. П., Пеккер И. И. Ферротестер для постоянных магнитов. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
2. Коган Б. Я. Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования. М.—Л., Физматгиз, 1963.
3. Полонников Д. Е. Широкополосные решающие усилители. «Автоматика и телемеханика», 1960, № 12.

**МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ  
И ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПОСТОЯННЫХ  
МАГНИТОВ И СИСТЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

Вопросы стабильности постоянных магнитов и систем с постоянными магнитами имеют существенное значение при оценке надежности электромагнитных механизмов, приборов и устройств. Под стабильностью магнитов или систем понимают постоянство их магнитных характеристик во времени, а также при воздействии положительных и отрицательных температур, внешних магнитных полей, вибраций, ударов и др. Важным параметром является температурный коэффициент характеристики в различных диапазонах температур (имеются в виду обратимые процессы изменения магнитных характеристик).

В большинстве случаев за основную характеристику принимают магнитную индукцию в рабочем пространстве, а иногда и магнитный момент. Их целесообразно измерять при исследовании стабильности и температурного коэффициента магнитов.

Выбирая методы и аппаратуру для этой цели, необходимо иметь в виду следующее:

1. Магнитное поле в рабочем пространстве бывает однородным плоскопараллельным или радиальным и неоднородным.
2. Геометрические размеры рабочего пространства могут варьировать в широких пределах и в ряде случаев оказываются весьма небольшими, что естественно влияет на выбор измерительного преобразователя и метода измерения.
3. Магниты из современных материалов обладают достаточно высокой стабильностью. В некоторых случаях от магнитов и систем требуется очень высокая стабильность, например в измерительных приборах высокого класса точности. При этом изменения индукции в рабочем пространстве не должны превышать нескольких сотых процента при абсолютной величине индукции порядка 0,2 тл.
4. Практика требует знания поведения магнитов в широком диапазоне температур  $(-180) \div (+550)^\circ \text{C}$ .
5. Стабильность систем с постоянными магнитами зависит от конфигурации, размеров и вида магнитных материалов, входящих в магнитную цепь. Поэтому ее целесообразно изучать либо на реальных магнитных системах, либо в таких условиях, которые бы возможно ближе соответствовали в магнитном отношении условиям работы магнита. При этом можно использовать любой метод и аппаратуру, позволяющие измерять плотность магнитного потока в воздушном пространстве.

Учитывая изложенное выше, рассмотрим такие методы и аппаратуру, которые обеспечивают высокую чувствительность (порог чувствительности порядка  $1 \cdot 10^{-8}$  тл) и воспроизводимость результатов измерения в пределах 0,01—0,02%, обратив особое внимание на методы уравнивания — нулевые или разностные. Что же касается методов непосредственной оценки, то лишь некоторые из них могут быть использованы, так как в большинстве случаев воспроизводимость результатов здесь недостаточна.

При изучении стабильности магнитов, для которых определяющей характеристикой является магнитный момент, необходимо измерять эту величину или функционально с нею связанную. Нам представляется, что иногда вместо магнитного момента можно определять остаточный магнитный поток магнита. Следует иметь в виду, что температурный коэффициент самого измерительного устройства должен быть небольшим, а аппаратура для измерений достаточно простой, чтобы можно было исследовать большое число образцов.

#### Измерительная аппаратура, основанная на индукционно-импульсном методе измерения магнитного потока

В СССР и за рубежом стабильность магнитов исследуют, как правило, индукционно-импульсным нулевым методом уравнивания\*. В известных авторам измерительных устройствах сравнивают два магнитных потока (известный и измеряемый), т. е. импульсы э. д. с. или токов, в зависимости от применяемого указателя равновесия. В этом случае, очевидно, нужно иметь плавно регулируемый известный поток. Один из импульсов получают в измерительной катушке, чаще всего при удалении ее из поля измеряемого объекта; второй же — различными способами. В устройстве Тенцера [1] известный поток и соответствующий ему импульс создает катушка взаимной индуктивности, вторичная обмотка которой включена последовательно с измерительной катушкой. Регулируя ток в первичной катушке взаимной индуктивности, изменяют величину этого потока. С помощью механического и коммутирующего устройств при измерении одновременно выдергивают измерительную катушку и разрывают первичную цепь катушки взаимной индуктивности. Погрешность воспроизведения (во времени) известного потока при измерении тока компенсатором в соответствующих метрологических условиях без особого труда может быть доведена до  $\pm (0,01—0,02)$  %.

Что же касается измеряемого потока, то помимо указанной погрешности здесь возникает погрешность за счет фиксации равенства импульсов. Эта погрешность зависит в основном от формы и продолжительности сравниваемых импульсов (при данном указателе равновесия) [2]. Когда сравнивают импульсы разной природы, как например в устройстве Тенцера, уравнивание представляет довольно трудоемкую операцию, а главное сложно объективно установить момент равенства этих импульсов. Хотя при исследовании стабильности магнитов большее значение имеет воспроизводимость импульсов, однако указанные выше явления в некоторой степени влияют на результаты измерений, и относительная погрешность при сопоставлении результатов повторных измерений вряд ли может быть меньше нескольких сотых процента.

\* Индукционно-импульсный метод непосредственной оценки здесь не рассматривается, так как он не удовлетворяет требованиям в отношении точности и воспроизводимости результатов измерения.

В Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина (ЛПИ) создано подобное измерительное устройство, отличающееся от рассмотренного выше лишь тем, что в нем измеряемый импульс уравнивается разностью импульсов во вторичных обмотках двух катушек взаимной индуктивности [3]. Изменением постоянных времени первичных обмоток этих катушек удается изменять форму результирующего уравнивающего импульса и в некоторой степени улучшить условия уравнивания измеряемого импульса.

Клегг и Кайг, изучая влияние температуры на стабильность прямолинейных магнитов, применили разностный индукционно-импульсный метод прямого сравнения магнитных потоков [4]. Схема такого устройства показана на рис. 1.

Испытуемый 9 и стабилизированный образцовый 8 магниты помещены в трубку 7, на которую надета вторая трубка 4, снабженная обмотками 3

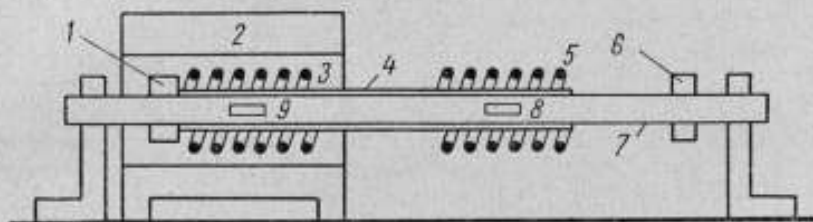


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для исследования прямолинейных магнитов, разработанного Клеггом и Кайгом и основанного на разностном индукционно-импульсном методе.

и 5. Обмотки соединены последовательно, навстречу друг другу. Трубка 4 может перемещаться между упорами 1 и 6. Левая ее часть с магнитом 9 находится в электрической печи 2. Магниты одинаковых размеров и формы изготовлены из одного материала. Это обеспечивает получение одинаковых по форме и продолжительности сравниваемых импульсов и их точное начальное уравнивание при нормальной температуре магнитов.

Надежность измерения определяется в основном стабильностью образцового магнита, требующей периодической проверки. Естественно, что при заметном отклонении магнитных свойств испытуемого магнита от свойств образцового точность измерений понижается, поскольку сравниваемые импульсы уже не идентичны и на погрешность результата измерений потока будет заметно влиять погрешность прибора непосредственной оценки, измеряющего разность сравниваемых магнитных потоков.

Описанное устройство благодаря его простоте целесообразно использовать для качественного производственного контроля однотипных магнитов, а также для исследования влияния температуры.

#### Электромеханическая измерительная аппаратура

В данном случае электромеханическими названы такие измерительные устройства, у которых измерительным преобразователем является электромеханический измерительный механизм. Далее рассмотрены устройства, где использован метод уравнивания.

В ЛПИ для исследования стабильности систем с постоянными магнитами электронизмерительных приборов разработан и широко используется компаратор (рис. 2), сочетающий магнитоэлектрический измерительный механизм (с испытуемой магнитной системой) и электродинамический астатический, с общей подвижной частью [5].

Вращающий момент, создаваемый магнитоэлектрическим механизмом, пропорциональный силе тока в рамке 2 и индукции магнитной системы 3, уравнивается направленным ему навстречу моментом электродинамического механизма 1, пропорциональным квадрату силы тока. Обмотки 1 соединены последовательно между собой и с рамкой 2, которую вводят в воздушный зазор исследуемой системы подъемным устройством 4. При равновесии подвижной части прибора индукция в зазоре прямо пропорциональна силе тока в подвижных обмотках, которую измеряют компенсатором. Чувствительность компаратора порядка 50 мм/мтл. При постоянной температуре (погрешность  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ ) в помещении, где он находится, воспроизводимость результатов относительных измерений индукции в магнитных системах составляет 0,01—0,02%.

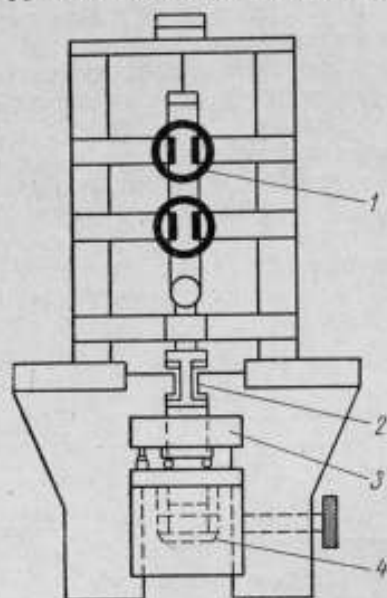


Рис. 2. Схема электромеханического компаратора ЛПИ.

Этим компаратором определяли также и температурный коэффициент магнитных систем. В данном случае погрешность за счет влияния температуры на прибор была невелика, ею можно было пренебречь. В основу устройства, разработанного Найтом (рис. 3), положен принцип чувствительных весов, помещенных в масляную ванну [6]. Это устройство было использовано без существенных изменений и в работах Вебба [7].

Коромысло  $KK'$  подвешивают на лентах  $LL'$  из фосфористой бронзы, которые служат для подводки тока к рамке  $P$ , жестко связанной с одним

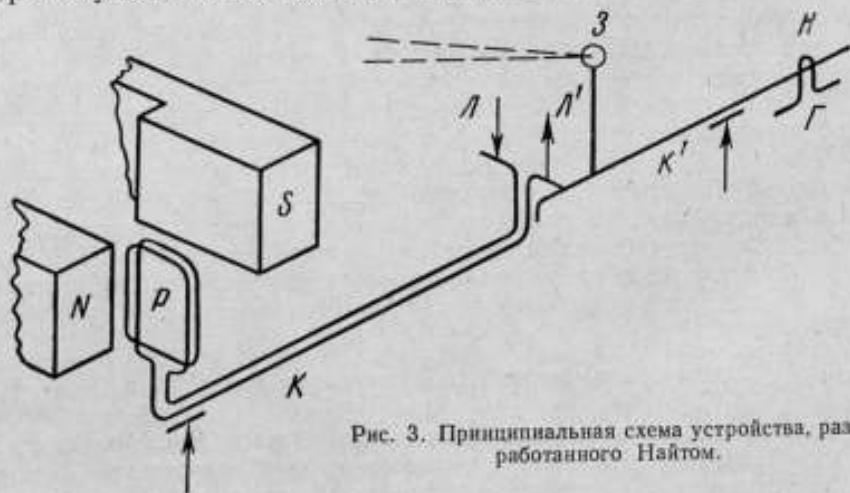


Рис. 3. Принципиальная схема устройства, разработанного Найтом.

концом коромысла. Рамку помещают в воздушный зазор исследуемого магнита. На другой, ножевидный конец  $H$  коромысла навешивают рейтер  $\Gamma$ . Изменяя в рамке ток, измеряемый компенсатором, уравнивают весы. Наблюдение ведут с помощью зеркала  $З$ , жестко скрепленного с коромыслом. Чувствительность устройства, как указывает Вебб, составляет



0,01% при индукции испытуемого магнита не ниже 0,08 тл. Найт определяет погрешность измерения, равную  $\pm 0,03\%$ .

В ЛПИ разработан прибор, основанный на таком же принципе. На этом приборе исследовали стабильность магнитных систем [3]. В отличие от описанных выше прибор ЛПИ работает не в масляной ванне, а на воздухе. Он имеет и конструктивные особенности, в частности его коромысло весов расположено на осях. Воспроизводимость результатов измерения здесь примерно  $\pm 0,03\%$  при чувствительности 50 мм/мтл. Температура поддерживалась постоянной с погрешностью  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ . Несмотря на высокую чувствительность и хорошую воспроизводимость результатов, измерения на этом приборе занимают много времени, а также сложно определять температурный коэффициент магнитных систем.

#### Измерительная аппаратура, основанная на индукционно-непрерывном методе

Для определения магнитной индукции через магнитный поток широко применяют приборы генераторного типа, основанные на индукционно-непрерывном методе. Подобными приборами измеряют э. д. с., индуктируемую во вращающейся или колеблющейся катушке, которую помещают в магнитное поле. Чтобы избежать погрешности за счет непостоянства скорости движения измерительной катушки, применяют устройства, основанные на нулевом методе уравнивания. Они состоят из двух измерительных катушек, укрепленных на общей оси и помещаемых в измеряемое и образцовое магнитные поля.

Недостатком устройств с вращающимися катушками является наличие скользящего контакта, что сильно затрудняет точную компенсацию э. д. с. вблизи нуля. Применение трансформаторов с вращающейся первичной обмоткой и неподвижной вторичной существенных улучшений не дает [8]. Для генераторов с вращающимися катушками трудно получить погрешность меньше  $\pm 0,05\%$  [9].

Замена этих катушек вибрирующими исключает коллекторные шумы, благодаря чему уменьшается погрешность измерений. Измеряемая и известная э. д. с. могут индуктироваться вследствие крутильных [10] или возвратно-поступательных [11] колебаний катушек. Фонер разработал прибор, в котором э. д. с. индуктировалась в неподвижных катушках за счет вибрирования стабилизированного постоянного магнита и испытуемого образца, укрепленных на общей оси [12, 13].

В известных авторам устройствах с вращающимися или вибрирующими катушками в качестве образцового служит поле стабилизированного постоянного магнита или катушки Гельмгольца. При использовании постоянного магнита возникает необходимость периодической его проверки и учета температурного коэффициента. В случае частичной утраты магнитных свойств магнитом воспроизвести измерения невозможно. Применение в качестве образцового поля электромагнита, определяемого по току в его обмотках<sup>\*</sup>, вызывает дополнительную погрешность за счет гистерезиса и изменения магнитных свойств материала электромагнита. Катушка же Гельмгольца создает только относительно слабые магнитные поля.

Высокая чувствительность, широкий диапазон измерения магнитных индукций, надежность и простота техники измерений, а также возможность автоматизации — все это позволяет рекомендовать разработку более совершенных устройств, основанных на индукционно-непрерывном методе.

\* Патент ФРГ № 1075214, кл. 21-е, 12, 1965.

### Измерительные устройства с гальваномагнитными, ферромагнитными и ядерными преобразователями и комбинированные

В последнее время для измерения магнитной индукции широко применяют преобразователи Холла. Существенным достоинством этих преобразователей является то, что они дают возможность измерять индукцию в узких зазорах и при этом находятся в стационарном положении. Однако точность и воспроизводимость результатов измерений даже в схемах уравнивания вряд ли могут быть в настоящее время меньше десятых долей процента.

Феррозондами, нам представляется, целесообразно определять температурные коэффициенты магнитов, когда допустима относительно большая погрешность измерения (порядка десятых долей процента). Однако, применяя метод уравнивания, можно ожидать высокую воспроизводимость результатов измерения. Так, например, Е. Н. Андриевский успешно использовал феррозонды в схеме уравнивания при исследовании влияния температуры и магнитного поля на поведение прямолинейных магнитов из никельалюминиевых сплавов [14, 15].

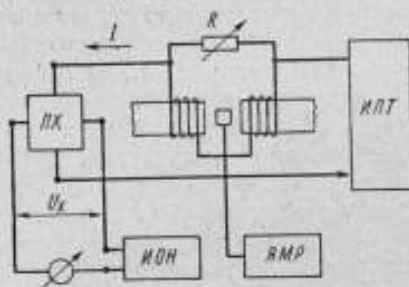


Рис. 4. Структурная схема установки Цингери с преобразователями Холла и ЯМР.

Исследуя стабильность магнитов, Андриевский фиксировал изменения их остаточной намагниченности в пределах до нескольких тысячных долей процента. Погрешность измерения температурного коэффициента постоянных магнитов оценивается им порядка  $\pm (2,5 \div 3,0) \%$ . Более интересны в этом отношении ядерные преобразователи, в которых используют, в частности, явление протонного магнитного резонанса. Измерительные устройства с такими преобразователями, выпускаемые промышленностью, обеспечивают высокую точность и воспроизводимость результатов измерений. Изучая стабильность магнитов и систем, не представляет труда получить погрешность  $\pm 0,01 \%$  в области индукций, которые встречаются в практике, а при определенных условиях может быть достигнута и более высокая точность. К недостаткам таких устройств можно отнести относительно большой объем преобразователей и ограниченные возможности измерений в неоднородных магнитных полях. Так, например, прибор ИМИ-2 при неоднородности поля  $0,2\%$  на  $1 \text{ см}$  дает погрешность  $\pm 0,1 \%$ , а наименьший зазор, в котором возможно измерение, составляет  $11,5 \text{ мм}$ . Преобразователями объемом  $1 \text{ мм}^3$  можно измерять поля магнитной индукции  $0,2 \text{ тл}$  и более при неоднородности  $2\%$  на  $1 \text{ см}$  [16]. Применение такого рода измерительных устройств следует считать перспективным.

Стремление использовать положительные свойства одних преобразователей и исключить или существенно уменьшить влияние отрицательных свойств других навело на мысль создать комбинированные измерительные устройства с преобразователями различного вида.

Цингери разработал установку для исследования стабильности магнитной системы сложной конфигурации (6-полосной) с сильно неоднородным полем [17]. Ее структурная схема изображена на рис. 4.

Напряжение  $U_x = 40 \text{ мв}$  преобразователя Холла ПХ, находящегося в зазоре испытуемой системы, уравнивают напряжением  $U_0$  от регу-

лируемого источника образцового напряжения *ИОН*. Затем преобразователь помещают в однородное магнитное поле электромагнита, поддерживая силу тока *I* в *ПХ* неизменной. Регулируя ток в обмотке электромагнита, питаемой от источника постоянного тока *ИПТ*, снова добиваются компенсации напряжений  $U_x$  и  $U_0$ . После этого определяют индукцию поля электромагнита с помощью устройства ядерного магнитного резонанса *ЯМР*. При использовании специального устройства для контроля температуры преобразователя Холла с погрешностью  $\pm 0,01^\circ \text{F}$  погрешность измерения индукции исследуемой системы оценивается Цингери в  $\pm 0,003\%$ .

Нам представляется, что для испытания большого количества магнитных систем эта установка вряд ли может быть рекомендована, так как получение столь малой погрешности требует особых метрологических условий измерений и устройств для воспроизведения с большой точностью расположения преобразователя Холла.

В ЛПИ разработан компаратор (рис. 5), в котором используют нулевой индукционно-импульсный метод прямого сравнения магнитных потоков. Прибор снабжен измерительным устройством *ЯМР* для контроля магнитной индукции поля, поток которой сравнивают с потоком испытуемого магнита [18]. Принцип действия прибора основан на сравнении двух импульсов тока: первый возникает в измерительной рамке *1* при ее удалении из неоднородного поля испытуемого магнита *2*; второй — в рамке *7* при удалении ее из однородного поля электромагнита *4*. Уравновешивания импульсов достигают изменением тока в обмотке электромагнита. Момент равновесия фиксируют баллистическим гальванометром *8*. Измерительные катушки, жестко связанные между собой, одновременно удаляют из известного и испытуемого полей с помощью пружины *3* и защелки *9*.

При сравнении импульсов тока разной природы в данном устройстве можно избежать некоторых из отмеченных выше недостатков нулевого индукционно-импульсного метода, так как по форме и продолжительности сравниваемые импульсы довольно близки между собой.

Высокая воспроизводимость результатов измерения достигается благодаря контролю индукции поля электромагнита, осуществляемому измерительным устройством ядерного магнитного резонанса *6* с частотометром *5*. Исследование макета установки показало, что ее погрешность не превышает  $\pm 0,01\%$ . Достоинством компаратора является и то, что индукция поля, поток которой сравнивают с неизвестным потоком, систематически контролируется с большой степенью точности. Этого лишены все описанные выше измерительные устройства, кроме установки Цингери. На данном компараторе можно исследовать также и влияние температуры на магниты и системы. Чувствительность прибора в значительной мере

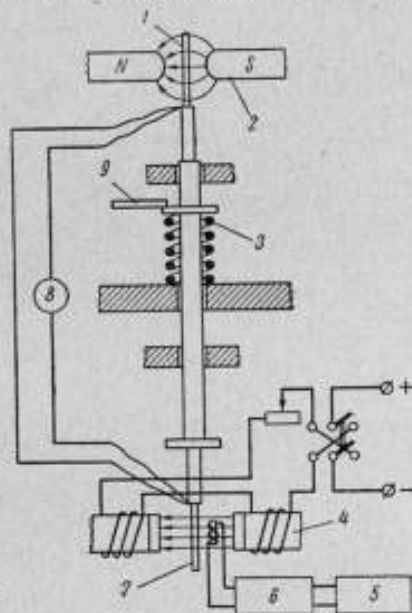


Рис. 5. Схема компаратора ЛПИ, основанного на нулевом индукционно-импульсном методе.

зависит от чувствительности указателя равновесия — баллистического гальванометра.

Для изучения стабильности магнитных систем с радиальным магнитным полем предлагается применять компаратор (рис. 6), сочетающий в себе сдвоенный магнитоэлектрический измерительный механизм и устройство ЯМР [19]\*. Принцип действия прибора основан на сравнении вращающих моментов двух магнитоэлектрических измерительных механизмов. На общей вертикальной оси 4 жестко укреплены две рамки 5 и 1, первая из которых помещена в воздушный зазор исследуемой магнитной системы 6 с радиальным полем, вторая — в межполюсное пространство электромагнита 2 с однородным (в зоне расположения рамки) плоскопараллельным полем. Рамки включают последовательно и питаются от общего источника постоянного тока.

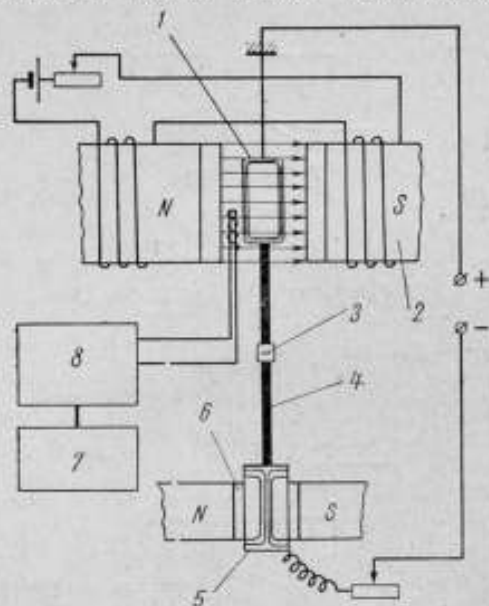


Рис. 6. Схема компаратора ЛПИ для исследования магнитов с радиальным полем.

Изменяя ток в обмотке электромагнита, добиваются равенства вращающих моментов, направленных навстречу друг другу. Нулевое положение подвижной части прибора (при равенстве моментов) фиксируют с помощью зеркала 3. В этом положении плоскость рамки 1 совпадает с направлением вектора индукции в поле электромагнита.

При равенстве вращающих моментов индукция испытуемой системы

$$B_x = KB_0,$$

где

$$K = \frac{S_0 \omega_0}{S_x \omega_x};$$

$B_0$  — индукция электромагнита;

$S_x$  и  $S_0$  — сечения рамок 5 и 1;  $\omega_x$  и  $\omega_0$  — числа витков этих рамок.

По достижении равенства вращающих моментов измеряют индукцию в электромагните с помощью устройства ядерного магнитного резонанса 8:

$$B_x = Cf,$$

где

$$C = K \frac{2\pi}{\gamma};$$

$f$  — резонансная частота;

$\gamma$  — гиромагнитное отношение используемых ядер в преобразователе ЯМР.

Анализ показал, что погрешность измерений данным компаратором может не превышать  $\pm 0,01\%$  при условии измерения частоты цифровым частотомером 7 (погрешность  $\pm 0,001\%$ ) и неоднородности поля не более

\* См. также Спектор С. А., Зайцев В. И. Способ измерения магнитной индукции неоднородных магнитных полей. Авторское свидетельство № 165823. «Бюллетень изобретений», 1964, № 20

0,001% в межполюсном пространстве электромагнита, где расположена рамка 1.

В ЛПИ создан компаратор (рис. 7, а, б), в основу которого положены два метода — нулевой индукционно-непрерывный и метод ядерного магнитного резонанса.

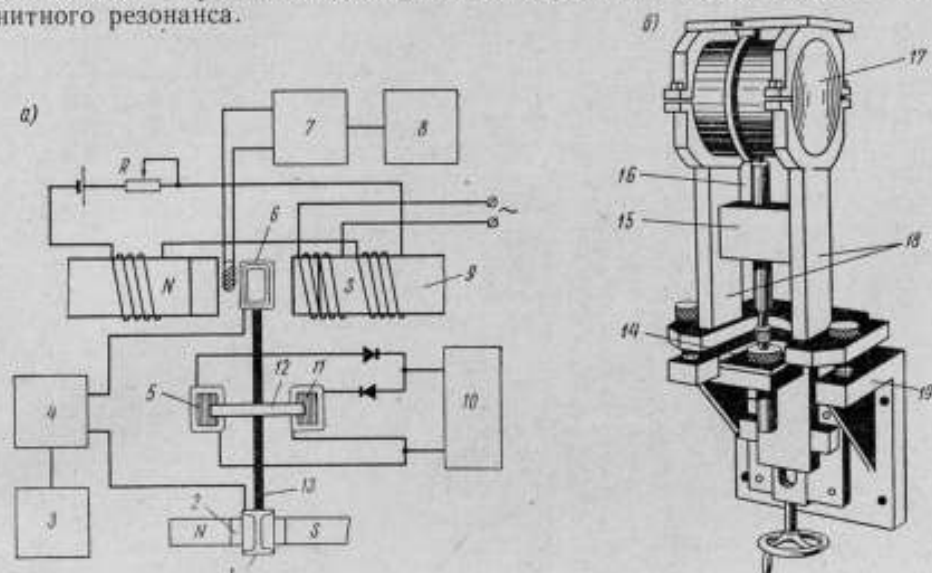


Рис. 7. Структурная схема (а) и общий вид (б) компаратора ЛПИ, основанного на нулевом индукционно-непрерывном методе и методе ЯМР.

На вертикальном медном стержне 13 (рис. 7, а), выполненном в виде трубки, жестко укреплены рамки 1 и б, помещенные соответственно в воздушный зазор исследуемой магнитной системы 2 и однородное поле электромагнита 9. Стержень 13 укреплен на основании прибора двумя парами скрещенных плоских пружин, расположенных внутри трубки на ее концах, что допускает возможность колебаний рамок относительно оси. Посредине стержня жестко закреплена стальная пластина 12 — якорь электромагнитов 5 и 11, обмотки которых питаются от звукового генератора 10. Благодаря двум выпрямителям в цепи стержень с рамками совершает крутильные колебания с частотой, задаваемой генератором 10. Рамки включены последовательно и встречно, разностная э. д. с. подается через усилитель 4 на нулевой указатель 3. Компенсация достигается изменением магнитной индукции в зазоре электромагнита. Величину индукции определяют с помощью аппаратуры ядерного магнитного резонанса 7 с частотомером 8.

На данном компараторе проводились исследования магнитных систем с внутрирамочными магнитами из сплава ЮНДК 24. Прибор монтирован на литом дюралевом кронштейне 19 (рис. 7, б). На двух массивных стойках 18 укреплен электромагнит 17 броневого типа для устройства ЯМР. К пластине 12, соединенной со стойками 18, прикреплена латунная трубка 16 с рамками

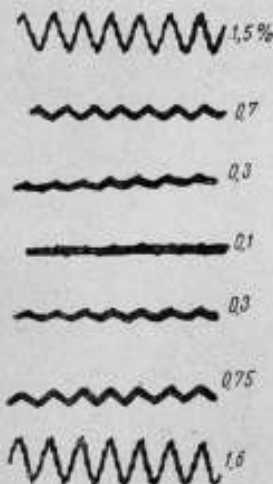


Рис. 8. Осциллограммы разностной э. д. с. при различных степенях компенсации (%).

на концах. Электромагниты, приводящие в колебательное движение трубку 16, помещены в специальный экран-коробку 15. Испытуемая магнитная система 14 помещена на каретке и может перемещаться в вертикальном направлении посредством ходового винта.

Испытуемые системы укрепляли в специальных оправках, чтобы обеспечить одинаковую повторную их установку в приборе. Испытания проводили при частоте колебаний 300 гц, близкой к резонансной (310 гц); выходной сигнал с каждой рамки был равен 500 мв. При использовании в качестве нулевого прибора лампового вольтметра типа ВЗ-7 с пределом измерения 1 мв порог чувствительности составлял  $5 \cdot 10^{-6}$  тл. Чувствительность компаратора можно повысить, применив узкополосный усилитель, включенный перед нулевым указателем. Воспроизводимость результатов измерения при поддержании постоянной температуры (погрешность  $\pm 0,1^\circ \text{C}$ ) составляла 0,01%. Благодаря жесткой конструкции установки (размер плоских пружин  $0,5 \times 4 \times 12$  мм) механические внешние воздействия, например щелчки, тряска и т. д., практически не влияли на результаты измерений.

На компараторе определяли также температурный коэффициент систем с внутрирамочным магнитом в диапазоне температур 20—80° С. Исследуемую магнитную систему помещали в цилиндрическую электрическую печь. Верхний предел температуры в данном случае ограничен материалом каркаса измерительной рамки (неолейкорит).

На рис. 8 приведены осциллограммы разностной э. д. с. при различных степенях компенсации (в процентах).

### Выводы

1. Из методов непосредственной оценки только метод ЯМР удовлетворяет требованиям точности измерения. Однако он применим лишь для исследования однородных магнитных полей и в узком диапазоне температур. Тем не менее следует рекомендовать создание малогабаритных преобразователей ЯМР; в этом случае требования к однородности исследуемого поля не будут такими жесткими.

2. В настоящее время предпочтение следует отдать методам уравнивания. Электромеханические устройства имеют общий недостаток — сложность объективного контроля стабильности самого измерительного устройства. В этом отношении предпочтительнее устройства, основанные на индукционном методе с использованием мер магнитного потока (катушек взаимной индуктивности), так как стабильность мер магнитного потока достаточно велика и может быть проконтролирована с требуемой точностью. Нам представляется, что они обладают большими возможностями и в отношении применения их в широком диапазоне температур. В остальном же эти разновидности устройств существенно не отличаются.

3. Сочетание электромеханических устройств или устройств, основанных на индукционном методе, с аппаратурой ЯМР обеспечивает требуемую не только относительную, но и абсолютную точность измерений. Перспективными следует считать также установки, в основу которых положены нулевой индукционно-непрерывный метод в сочетании с методом ЯМР. Измерения в этом случае выполняются значительно проще и быстрее. Кроме того, конструкция таких установок достаточно надежна, и они мало подвержены влиянию внешних воздействий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Tenzer R. R. Beitrag zum ballistischen Nullverfahren für die Präzisionsmessung der magnetischen Induction. «Arch. f. Electrotechn.», 1952, v. 40, № 7.
2. Tenzer R. R. Eine Präzisionsmeseinrichtung für Alterungsuntersuchungen an Dauermagneten. «Arch. Techn. Messen», 1955, № 239.
3. Шрамков Е. Г., Миткевич А. В., Ковалев Н. Б. Исследование методов стабилизации магнитных систем с постоянными магнитами. «Труды ЛПИ», № 184, 1956.
4. Clegg A. G. and Craig M. M. The high temperature stability of permanent magnets of the iron-nickel-aluminium system. Brit. «J. appl. phys», 1958, v. 9, № 5.
5. Миткевич А. В., Шрамков Е. Г. Аппаратура для исследования стабильности магнитных систем с постоянными магнитами. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
6. Knight S. F. A. Sensitive Balance of stability Tests on Permanent Magnets. «Proc. Inst. Elect. Eng.», 1949, v. 96.
7. Webb S. E. The Stability of Permanent Magnets. «Proc. Inst. Elect. Eng.», 1961, v. 108, part C, № 14.
8. Will's M. S. Rotating coil Fluxmeter. «J. sci. instrum.», 1952, v. 29, № 11.
9. Румянцев А. С. Индукционные методы измерения напряженности сильных постоянных магнитных полей. «Труды ВНИИМ», вып. 29 (89). М.—Л., Машиз, 1956.
10. Caldecourt V. T., Adler S. E. A mass indicator using a Vibrating coil magnetometer. «Rev. sci. instrum.», 1954, v. 25, № 10.
11. Smith D. O. Development of a Vibrating-coil magnetometer. «Rev. sci. instrum.» 1956, v. 27, № 5.
12. Foner S. A Vibrating Sample Magnetometer. «Rev. sci. instrum.», 1956, v. 27, N 5.
13. Foner S. Versatile and Sensitive Vibrating Sample Magnetometer. «Rev. sci. instrum.», 1959, v. 30.
14. Блажкевич Б. И., Андриевский Е. А. Применение магнитомодуляционных датчиков для измерения температурных коэффициентов и магнитного момента постоянных магнитов. «Труды ВНИИГК», вып. 1, 1957.
15. Андриевский Е. А. Влияние температуры и внешнего магнитного поля на стабильность магнитных свойств постоянных магнитов из Fe—Ni—Al-сплавов. Автореферат диссертации. Львовский политехнический институт, 1960.
16. Шрамков Е. Г., Спектор С. А. Некоторые применения ядерного магнитного резонанса в электроизмерительной технике. «Вестник приборостроения», 1959, № 1.
17. Zingery W. L. Sistem for the Precision Measurement of Long-Time Change of an Inhomogeneous Magnetic Field. «Rev. sci. instrum.», 1961, v. 32, № 6.
18. Зайцев В. И., Спектор С. А. Измерение неоднородных магнитных полей постоянных магнитов в широком диапазоне температур методом ядерного магнитного резонанса. «Труды ЛПИ», № 256, 1965.
19. Зайцев В. И., Спектор С. А. Компенсационное устройство с частотным выходом для измерения магнитной индукции постоянных магнитов. «Труды ЛПИ», № 256, 1965.

# МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ, И ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК; МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

УДК 621.3.042.15.083

А. И. ПИРОГОВ, Ю. М. ШАМАЕВ

## СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ МАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

Одна из основных статических характеристик сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) — предельная петля гистерезиса  $H_{ст} = F(B)$ . Для магнитномягких материалов с ППГ она может быть экспериментально получена в намагничивающих полях, равных нескольким коэрцитивным силам  $H_c$ . Чтобы определить статические свойства сердечников из различных магнитных материалов, следует сравнить их по параметрам, являющимся характерными точками указанной статической зависимости. Кроме коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_r$ , за основные статические параметры сердечников с ППГ принимают коэффициент прямоугольности  $\alpha = \frac{B_r}{B_m}$  ( $B_m$  — максимальное значение магнитной индукции), напряженности полей трогания  $H_{тр}$ , финиша  $H_\phi$  и граничного  $H_{гр}$ , характеризующие прямоугольность и квадратность петли гистерезиса (рис. 1) [1]. Для магнитных сердечников конкретных размеров соответствующие параметры следует выражать в величинах потоков  $\Phi_r$  и намагничивающих сил  $(Iw)_c$ ,  $(Iw)_{тр}$ ,  $(Iw)_\phi$ .

Динамической характеристикой магнитных материалов с ППГ является поверхность динамического состояния, описываемая следующим уравнением при линейной аппроксимации экспериментальных зависимостей [1, 2]:

$$\frac{dB}{dt} = r(B) H_x(B),$$

где  $r(B)$  — динамическое сопротивление материала — функция, характеризующая магнитную вязкость;

$H_x(B)$  — напряженность действующего поля.

Сечения динамической поверхности плоскостями  $B = \text{const}$  и  $H = \text{const}$  позволяют получить соответственно характеристики  $\frac{dB}{dt} = F(H)$  и  $r = F(B)$  [1, 2].



При полном перемагничивании ( $H > H_{cr}$ ) работа сердечника в режиме переключения характеризуется динамической зависимостью

$$B = F(Q_d), \quad (1)$$

где  $Q_d$  — приведенный действующий заряд,

$$Q_d = \int_0^t H_x dt.$$

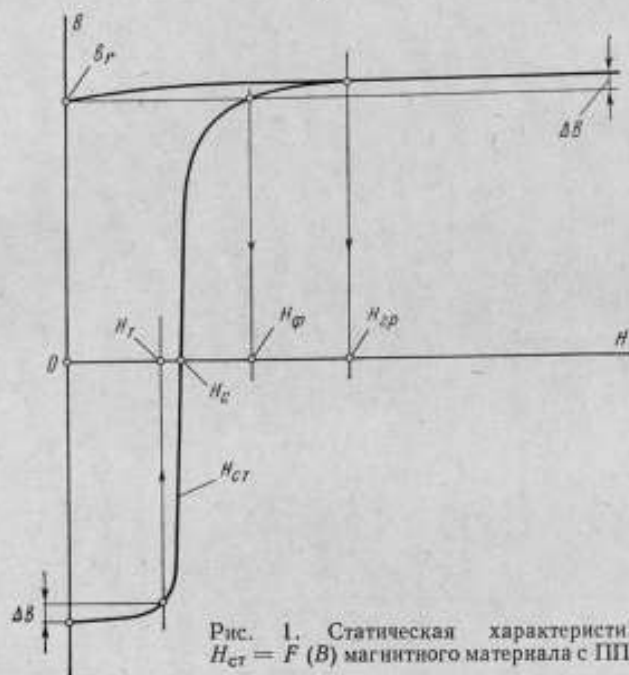


Рис. 1. Статическая характеристика  $H_{сг} = F(B)$  магнитного материала с ППГ.

Динамическими параметрами сердечников с ППГ являются:

а) максимум динамического сопротивления

$$r_m = \left( \frac{dB}{dQ_d} \right)_m;$$

б) коэффициент переключения  $S_w$  — приведенный действующий заряд, необходимый для полного перемагничивания сердечника за время  $\tau$ ,

$$S_w = \int_0^{\tau} H_x dt;$$

в) напряженность поля  $H_m$ .

Указанные параметры могут быть получены из экспериментально снятых и линейно аппроксимированных зависимостей [совмещенных на рис. 2 с  $H_{сг} = F(B)$ ]:

$$\tau^{-1} = F_1(H_m); \quad (2)$$

$$\left( \frac{dB}{dt} \right)_m = F_2(H_m), \quad (3)$$

где  $H_m$  — максимальное значение напряженности поля, а также из характеристики  $B = F_3(Q_d)$ .

Число параметров  $r_m$ ,  $S_w$  и  $H_0$  соответствует числу линейных участков, аппроксимирующих зависимости (2) и (3). В диапазоне намагничивающих полей, соответствующем времени перемагничивания примерно 10—0,1 мксек, эти зависимости аппроксимируются двумя участками, для которых определяются  $r_{m1,2}$ ,  $S_{w1,2}$  и  $H_{01,2}$ .

Основные статические и динамические характеристики и параметры при полном перемагничивании сердечников с ППГ приведены в работе [1].

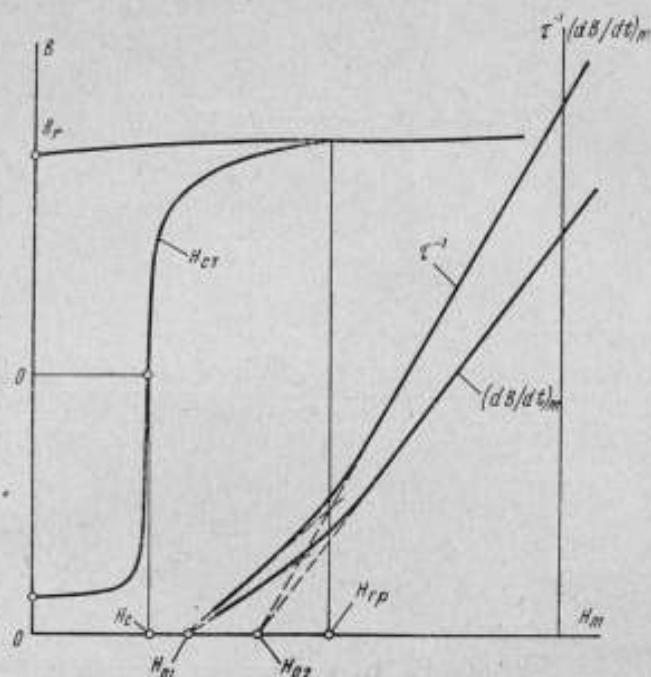


Рис. 2. Динамические характеристики  $\tau^{-1} = F_1(H_m)$ ,  $(dB/dt)_m = F_2(H_m)$  магнитных материалов с ППГ.

Экспериментально полученная зависимость (3) может быть описана уравнением

$$\left(\frac{dB}{dt}\right) = R_m [1 + v |H_x|] H_d, \quad (4)$$

где  $R_m$  — максимальное динамическое сопротивление сердечника;  
 $v$  — постоянная;

$$H_d = H_m - H_c.$$

Как видно из уравнения (4), процесс перемагничивания сердечников с ППГ зависит от  $R_m$  и  $v$  [3].

При динамическом намагничивании ферромагнетиков полем напряженностью, соизмеримой с  $H_c$ , время изменения магнитного состояния до статического характеризуется условным параметром  $t_y$  — временем установления, определяемым процессами, обусловленными магнитной сверхвязкостью [4].

Измерение статических характеристик и параметров миниатюрных сердечников с ППГ, широко применяемых в счетно-решающих устройствах, бесконтактной автоматике и радиотехнике, является трудной зада-

чей ввиду малого полного магнитного потока  $\Delta\Phi = 2B_r S \ll 10^{-2}$  мквб ( $S$  — сечение сердечника).

В настоящее время применяют следующие методы измерения статических характеристик этих сердечников: а) основанный на использовании баллистического гальванометра (чувствительных флюксометров); б) электронно-осциллографический [1,5]; в) импульсного считывания [1,4]; г) резонансный [6]. Для измерения статических характеристик отдельных малогабаритных сердечников с погрешностью не более  $\pm 5\%$  можно использовать два последних метода. Электронно-осциллографический метод позволяет производить оперативные и наглядные измерения, однако погрешность при этом слишком велика (не менее  $\pm 10\%$ ). Измерения же статических характеристик нескольких сердечников одновременно следует считать неприемлемыми.

Для определения динамических свойств магнитных материалов с прямоугольной статической характеристикой перемагничивания частотные методы неприменимы. Динамические характеристики ферромагнитных сердечников с ППГ измеряют при намагничивании образцов импульсами напряженности поля по полному и частным циклам [1, 2]. На рис. 3 приведена блок-схема универсальной установки, используемой для этой цели, а на рис. 4, а, б, в — программы импульсов напряженности поля.

При экспериментальном определении динамических характеристик (2) и (3) измеряют параметры ( $I_m$ ,  $U_m$ ,  $\tau$  и др.) прямоугольного импульса намагничивающего тока  $i = F(t)$  и напряжения  $u = F(t)$  на измерительной обмотке.

Измеряя динамические характеристики и параметры магнитных сердечников, необходимо свести к минимуму влияние аппаратуры на получаемые результаты.

К генератору импульсов тока ГИ (рис. 3, каналы I, II, III) предъявляют следующие требования:

1. Генератор должен быть источником тока, т. е. его внутреннее сопротивление  $R_i$  должно быть намного больше эквивалентного сопротивления сердечника относительно намагничивающей обмотки  $w$ , максимальную величину которого определяют из выражения [1]

$$R_m = r_m \frac{w^2 S}{l},$$

где  $l$  — длина пути магнитных линий.

Для создания больших полей в сердечнике при неискаженной прямоугольной форме и малой амплитуде импульса тока 0,5—1 а необходимо большое внутреннее сопротивление  $R_i \geq 500$  ом, так как число витков намагничивающей обмотки и размеры сердечника могут быть достаточно большими ( $w = 5-10$ , внешний диаметр сердечника  $D > 5$  мм).

2. Генератор должен обладать сравнительно большой амплитудой импульсов тока в случае  $D > 5$  мм. Чтобы напряженность намагничивающего поля  $H_m$  составляла, например, 1000 а/м при  $D \times d \times h = 10 \times 6 \times 2$  мм ( $d$  и  $h$  — внутренний диаметр и высота сердечника) и  $w = 5$ , необходима амплитуда тока

$$I_m = \frac{H_m l}{w} \approx \frac{1000 \cdot 0,025}{5} \approx 5 \text{ а.}$$

3. Форма импульса тока должна быть прямоугольной, т. е. выброс на переднем фронте и спад плоской вершины импульса относительно амплитуды тока  $I_m$ , не должны превышать 5%. Необходимо отсутствие выброса импульса тока обратной полярности, который размагничивает исследуемый образец. Длительность импульса должна быть достаточной

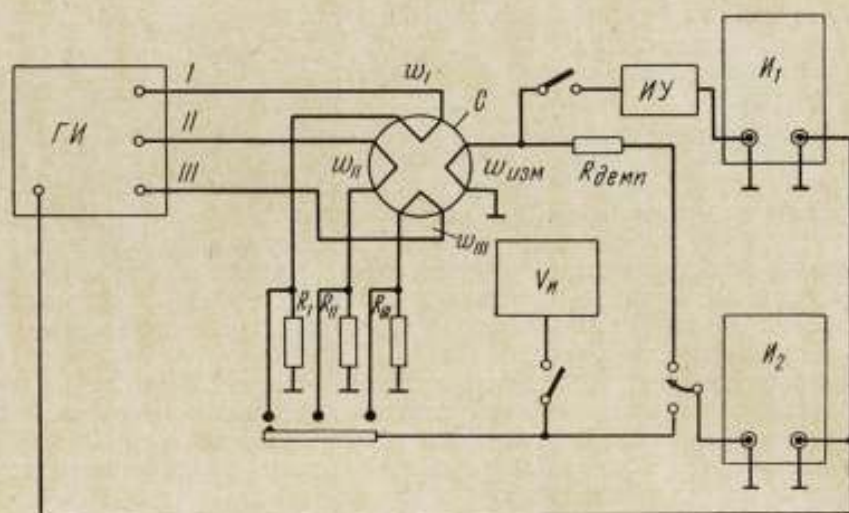


Рис. 3. Блок-схема установки для измерения динамических характеристик магнитных сердечников с ППГ.

ГИ — генератор импульсов тока; С — сердечник; ИУ — интегрирующий усилитель; И<sub>1</sub>, И<sub>2</sub> — осциллографические индикаторы; V<sub>н</sub> — импульсный вольтметр для измерения импульсов намагничивающего тока; R<sub>1</sub>, R<sub>II</sub> и R<sub>демп</sub> — контрольные и демпфирующее сопротивления; w<sub>I</sub>, w<sub>II</sub>, w<sub>III</sub> — намагничивающие обмотки; w<sub>изм</sub> — измерительная обмотка.

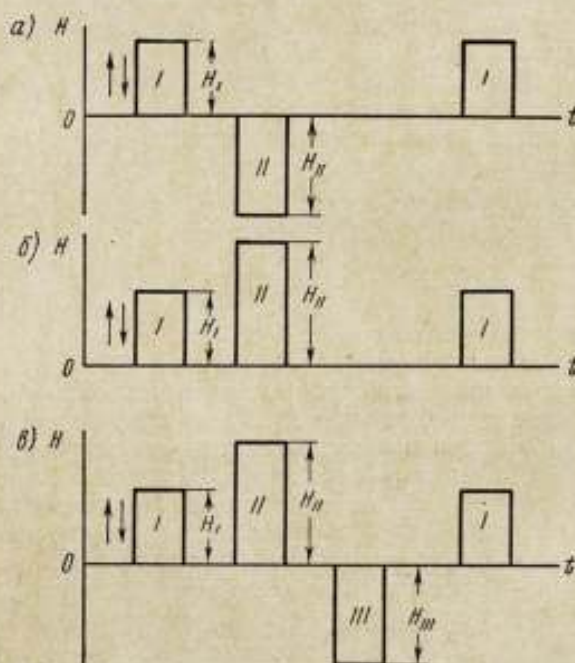


Рис. 4. Программы импульсов напряженности поля  $H = F(t)$ , используемые для перемагничивания сердечников по полному и частным циклам:

а — при перемагничивании по полному циклу из состояний  $\pm B_r$ ; б — при намагничивании в зоне насыщения из состояний  $\pm B_r$ ; в — при намагничивании из любого магнитного состояния  $B_{гр}$ , которое устанавливает соответственно выбранной величине напряженности поля  $H_{III}$ ; во всех случаях  $H_I = \text{var}$ ,  $H_{II} > H_{гр} = \text{const}$  и  $H_{III} = \text{const}$ .

для исследования динамических процессов при медленном перемагничивании сердечника. В случае незначительных превышений  $H_m$  над  $H_c$  время перемагничивания сердечника достигает нескольких десятков микросекунд. Следовательно, и максимальная длительность импульса тока не может быть меньше максимальной длительности процесса перемагничивания.

Влияние формы импульсов тока на результаты измерений характеристик, определяемых относительно  $H_m$ , будет наименьшим при минимальном переднем фронте импульса  $\tau_{фр}$  [1]. Известно, что ферритовые сердечники и сердечники из сверхтонкой (1,5–3 мкм) ферромагнитной ленты могут перемагничиваться при соответствующих полях за время порядка нескольких наносекунд [2]. Время перемагничивания ферромагнитных пленок будет таким же, а иногда и большим. Однако и при медленном перемагничивании сердечников необходима высокая скорость нарастания импульса намагничивающего тока для исследования динамики процесса в начальной стадии переключения.

4. Частота намагничивающих импульсов должна быть небольшой, так как при высокой частоте перемагничивания по полному циклу сердечник разогревается и в связи с этим изменяются его характеристики. Частоту импульсов тока измерительных генераторов устанавливают не более 1 кГц.

Осциллограф, на который подается импульс напряжения с измерительной обмотки, должен быть широкополосным (не менее 20 МГц), обладать минимальной входной емкостью (не более 20 пф) и максимальной скоростью развертки (30–10 см/мксек).

Динамические характеристики магнитных сердечников с ППГ, в том числе и зависимости (1), (2) и (3), экспериментально могут быть получены при обработке совмещенных осциллограмм намагничивающего тока  $i = F(t)$  и напряжения  $u = F(t)$ . Время перемагничивания обычно измеряют наиболее простым способом — по импульсу напряжения  $u$  на уровне  $0,1U_m$ . Однако при импульсном перемагничивании более объективным будет время  $\tau$  условно полного перемагничивания, определяемое при изменении индукции  $\Delta B = \text{const}$  (например, при  $\Delta B = 2B_s$ ).

Погрешность измерения динамических характеристик посредством современных отечественных осциллографических индикаторов не менее  $\pm 5\%$ . Поэтому одной из главных задач измерительной техники является создание метода высокоточного и оперативного определения параметров намагничивающих импульсов тока  $i$  и напряжения  $u$ .

Методы измерения, применяемые при полном переключении, оказываются непригодными для исследования динамики намагничивания сердечника с ППГ полем напряженностью, соизмеримой с  $H_c$ . Явление сверхвязкости, наблюдаемое в случае  $H \approx H_c$ , затягивает процесс намагничивания сердечника, так что время установления  $t_y$  его магнитного состояния, такого же, как и при статическом намагничивании, достигает, например для ферритов, нескольких миллисекунд [4].

Наряду с методами измерения магнитной вязкости, известными из работ Р. В. Телеснина и его сотрудников, разработан метод исследования процессов намагничивания сердечников в полях, соизмеримых с  $H_c$  [4]. Он основан на размагничивании образца прямоугольными импульсами тока, следующими с низкой частотой ( $< 25$  Гц), и сравнении возникающих импульсов напряжения на измерительной обмотке с напряжением от зондирующего размагничивающего импульса тока, который может запаздывать относительно начала процесса на время  $t = T - \tau_n$  ( $T$ ,  $\tau_n$  — соответственно период повторения и длительность размагничивающих импульсов тока).

Основными требованиями, предъявляемыми к установке для исследования магнитной сверхвязкости, являются низкая частота размагничивающих однополярных прямоугольных импульсов тока и большой диапазон времени задержки зондирующего импульса.

Характеристики и параметры магнитных сердечников с ППГ существенно зависят от режимов технологического процесса, поэтому могут значительно (более чем на  $\pm 50\%$ ) отличаться друг от друга как внутри одной партии, так и особенно между отдельными партиями. Подобный разброс характеристик и параметров, как и различие в размерах сердечников, недопустимы при создании надежной аппаратуры.

Разработчиков схем с магнитными сердечниками в конечном итоге интересует идентичность импульсов напряжений  $u$ , возникающих на обмотках  $w$ , которые подключаются к общей цепи передачи информации, и потоков в сердечниках

$$\Delta\Phi = \frac{1}{w} \int_0^t u dt.$$

Отсюда следует, что для обеспечения идентичности сердечников их магнитные свойства необходимо определять по импульсу напряжения  $u = \frac{w d\Phi}{dt}$ , возникающему на измерительной обмотке под действием намагничивающего поля по программе, соответствующей всем основным режимам работы сердечника в схеме. Программа импульсов намагничивающего поля должна позволять контролировать сердечники в различных режимах полного и частичного перемагничивания. Поэтому наряду с основными параметрами материала ( $H_c$ ,  $B_r$ ,  $H_T$ ,  $H_\Phi$ ,  $\alpha$ ,  $S_w$ ,  $r_m$ ,  $H_0$ ) сердечники с ППГ следует контролировать и по таким параметрам, как максимальная величина импульса напряжения  $U_m$ , время перемагничивания  $\tau$ , полный поток  $\Delta\Phi_m$ , поток помехи  $\Delta\Phi_n$ , намагничивающая сила трогания  $(I_w)_T = H_T l$  при определенной м. д. с. [1].

На рис. 5 приведена наиболее полная программа намагничивающих импульсов 1—6 при контроле сердечников накопительных и логических цепей, а также показана динамическая петля при перемагничивании сердечника (импульсы напряженности поля идеально прямоугольные).

Амплитуда, длительность и форма импульсов поля определяются конкретными условиями работы сердечников. Частота повторения перемагничивающих импульсов не должна быть высокой, в противном случае сердечники нагреваются при перемагничивании, что приводит к изменению характеристик контролируемых образцов.

Метод контроля, основанный на сравнении измеряемого сердечника с образцовым, может быть либо абсолютным, либо дифференциальным. Последний наиболее удобен — он отличается простотой и высокой чувствительностью и точностью (при относительно простых применяемых технических средствах), а также дает возможность автоматизации процесса контроля. Дифференциальный метод позволяет практически с любой степенью идентичности (по отношению к образцовому сердечнику) отбирать сердечники, перемагничивающиеся по заданной программе импульсов поля. Стабильность амплитуды намагничивающих импульсов в данном случае может быть не очень высокой, так как намагничивающее поле действует одновременно на образцовый и контролируемый сердечники. Величины импульсов практически могут изменяться на  $\pm 10\%$ , колебания температуры допускаются в пределах  $\pm 10^\circ \text{C}$ .

Очень важен выбор образцового сердечника, который должен удовлетворять всем техническим требованиям, в том числе и к параметрам:  $U_m$ ,  $\tau$ ,  $\Delta\Phi_m$ ,  $\Delta\Phi_n$ ,  $(I_w)_T$ .

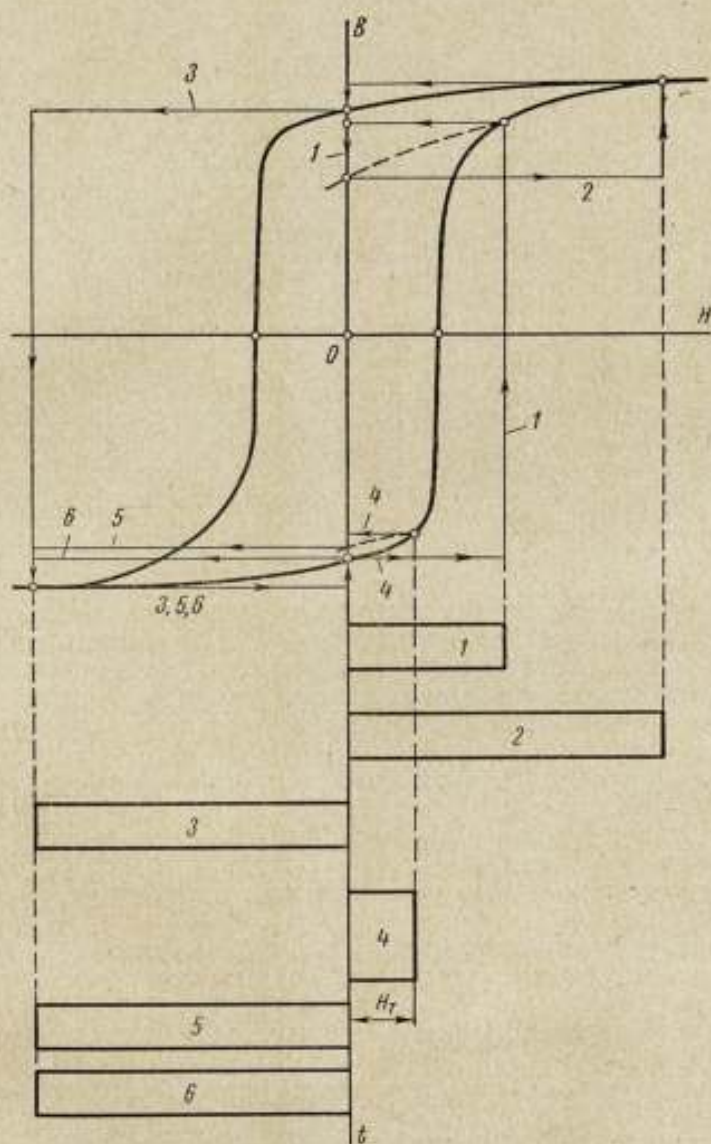


Рис. 5. Программа импульсов напряженности поля  $H = F(t)$  для контроля сердечников с ППГ, используемых в переключающих устройствах. Динамические циклы перемангнивания сердечника под действием этой программы.

При абсолютном (интегральном) методе контроля магнитных сердечников с ППГ, используемых в переключающих устройствах, необходимо контролировать величины  $\tau$ ,  $\Delta\Phi_m$ ,  $(I_m)_T$ .

### Выводы

1. Основной статической характеристикой магнитномягких материалов с ППГ следует считать предельную петлю гистерезиса  $H_{cr} = F(B)$ . Величину  $\Delta B = B_m - B_r$  необходимо определять при  $H_m = 5H_c$ .

2. Основные статические параметры магнитных материалов с ППГ:  $H_c$ ,  $B_r$ ,  $\alpha = \frac{B_r}{B_m}$  при  $H_m = 5H_c$ ,  $H_T$  (в относительных величинах  $\frac{H_T}{H_c}$ ),  $H_\Phi$  (или  $\frac{H_\Phi}{H_c}$ ).

3. Основные динамические характеристики магнитных сердечников с ППГ — зависимости  $\tau^{-1} = F_1(H_m)$ ,  $(\frac{dB}{dt})_m = F_2(H_m)$ , получаемые при полном перемагничивании сердечника прямоугольным импульсом поля напряженностью  $H_m$ .

4. Динамические параметры магнитных материалов с ППГ:  $r_m$ ,  $S_m$ ,  $H_\Phi$ ; последняя величина определяется из зависимостей (2) и (3) отрезком на оси  $H_m$ , отсекаемым прямыми, аппроксимирующими указанные зависимости. В нормативных документах эти параметры следует определять при  $H_m > H_{гр}$ .

5. Статические характеристики малогабаритных магнитных сердечников с ППГ необходимо определять методами: импульсного считывания, резонансным и электронно-осциллографическим (для оперативного визуального наблюдения петли гистерезиса). Необходимо создать приборы для измерения статических характеристик и параметров малогабаритных сердечников.

6. Динамические характеристики следует измерять по методике, описанной в работе [1].

Предъявляемые требования к параметрам намагничивающего прямоугольного импульса тока:

а) максимальная величина тока  $I_m$  должна плавно изменяться до 2 а и больше;

б) длительность переднего фронта  $\tau_{фр} \leq 0,01$  мксек;

в) длительность импульса, определяемая режимом перемагничивания, 10—20 мксек;

г) выброс на переднем фронте и спад плоской вершины импульса тока не более 5% от  $I_m$ ;

д) отсутствие выброса импульса тока обратной полярности на заднем фронте;

е) частота повторения импульсов тока — не более 1000 гц.

Одна из главных задач измерительной техники — разработка методов и приборов для точного объективного и оперативного измерения параметров импульсов  $i = F(t)$  и  $u = F(t)$ .

7. Для получения идентичных в магнитном отношении сердечников с ППГ необходимо их контролировать по импульсу напряжения  $u(t) = \frac{w d\Phi}{dt}$ , возникающему на обмотке под действием намагничивающего поля по программе, соответствующей основным режимам работы сердечника в схеме.



#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогов А. И., Шамаев Ю. М. Магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. М.—Л., «Энергия», 1964.
2. Ферриты. Физические и физико-химические свойства. Доклады III Всесоюзного совещания по физике, физико-химическим свойствам ферритов и физическим основам их применения. Минск, Изд. АН БССР, 1960.
3. Копорский А. С., Пирогов А. И., Шамаев Ю. М. Динамические характеристики магнитных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса и их аналитическое описание. «Автоматика и телемеханика», 1964, № 10.
4. Немцов М. В. Импульсное перематнивание ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса в слабых полях. Автореферат диссертации. МЭИ, 1963.
5. Кобелев В. В. Аппаратура для наблюдения петель гистерезиса магнитных элементов с весьма малым остаточным потоком. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
6. Тарасов С. И. Резонансный способ измерения приращений потока магнитной индукции при импульсном перематнивании сердечников. «Труды Вычислительного центра АН СССР». М., Изд. ВЦ АН СССР, 1964.

### АППАРАТУРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОГАБАРИТНЫХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЕТЛЕЙ ГИСТЕРЕЗИСА

Ферромагнитные сердечники, используемые в логических и запоминающих блоках цифровых вычислительных устройств, обычно изготовляют в виде малогабаритных колец из материалов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ). Такими материалами могут служить ферриты многих марок и ленты сверхтонкого проката из металлических сплавов типа пермаллой.

Ферромагнитные сердечники из материалов с ППГ характеризуются статическими параметрами — остаточной индукцией  $B_r$ , коэрцитивной силой  $H_c$  и коэффициентом прямоугольности  $\alpha = \frac{B_r}{B_m}$  ( $B_m$  — максимальная индукция, измеряемая при напряженности поля, равной  $5H_c$ ), а также динамическими, вычисляемыми по характеристике перемагничивания. Значительный интерес, с точки зрения авторов, представляют напряженность поля старта  $H_{ст}$ , при которой начинается резкое изменение индукции в образце, и напряженность поля финиша  $H_{ф}$ , при которой прекращается резкое изменение потока или индукции в образце. Параметры статической петли гистерезиса указаны на рис. 1.

Под характеристикой перемагничивания понимают зависимость длительности импульса э. д. с.  $\tau_n$ , получаемого при перемагничивании сердечника, от амплитуды напряженности перемагничивающего поля  $H$ . На рис. 2 изображена кривая  $\tau_n^{-1} = F(H)$ . По этой характеристике определяют напряженность поля трогания  $H_t$ , которая возникает при пересечении с осью абсцисс продолжения линейной части характеристики перемагничивания  $\tau_n^{-1}$ , и коэффициент перемагничивания  $S_{\tau} = \tau_n(H - H_t)$ .

Указанные статические и динамические характеристики необходимы и достаточны при разработке устройств вычислительной техники, выборе материала сердечника, его размеров, расчете элемента и т. п. Определение же свойств материала требуется при разработке новых материалов и для контроля правильности технологического режима в массовом производстве сердечников. В обоих случаях измерения проводятся на сравнительно небольшом количестве образцов.

Однако сердечники одной партии не имеют строго идентичных параметров (под партией понимают сердечники, изготовленные из одной и той же шихты и прошедшие одновременный обжиг в одной печи). Разброс параметров в одной партии зависит от многих технологических фак-

торов, отклонение их значений от номинальных в отдельных случаях может достигать 30—50%.

В то же время в вычислительной технике могут быть использованы только идентичные сердечники. Допустимое отклонение их параметров от номинальных значений колеблется от 5 до 15%, в зависимости от конкретной схемы. В связи с этим необходим 100%-ный контроль используемых сердечников.

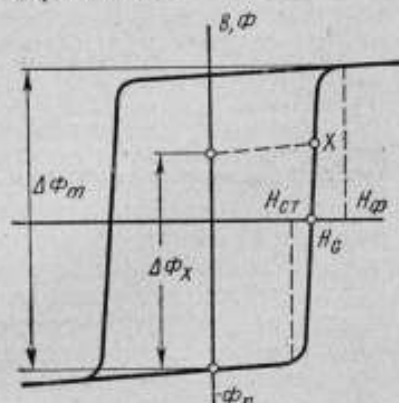


Рис. 1. Предельная статическая петля гистерезиса.

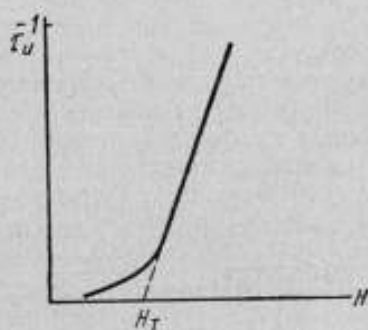


Рис. 2. Зависимость длительности импульса э. д. с.  $\tau_u^{-1}$  от напряженности намагничивающего поля.

Для измерения свойств малогабаритных сердечников из материалов с ППГ необходимо применять три группы измерительной аппаратуры:

- 1) для определения статической петли гистерезиса;
- 2) для измерения динамических характеристик;
- 3) для 100%-ного контроля сердечников.

#### Приборы для определения статической петли гистерезиса сердечников

До последнего времени статическую петлю гистерезиса получали главным образом баллистическим методом, основным недостатком которого является малая чувствительность регистрирующих приборов (баллистического гальванометра или микроверметра). При проверке малогабаритных сердечников несколько сердечников складывали столбиком либо наматывали на них большое число витков. Ни то, ни другое нельзя считать приемлемым. Более целесообразно применять импульсный метод с электронными или полупроводниковыми интеграторами, разработанный в Московском энергетическом и Ленинградском политехническом [1] институтах. Блок-схема установки для определения статической петли гистерезиса указанным методом приведена на рис. 3.

Сердечник намагничивается постоянным током и перемагничивается импульсами тока от генератора импульсов. Назовем эти импульсы перемагничивающими (считывающими). Промежуток времени между двумя соседними импульсами должен быть достаточным для того, чтобы намагничивание можно было считать статическим, а их амплитуда и длительность должны быть достаточными для полного перемагничивания испытуемого сердечника. При намагничивании и перемагничивании сердечника на его выходной обмотке появляется импульс э. д. с., площадь которого равна изменению потока в сердечнике. Под действием намагничивающего тока рабочая точка магнитной характеристики сердечника перемещается от

— $\Phi$ , (рис. 1) до точки  $X$ , соответствующей величине намагничивающего тока. Под действием перемещающего импульса тока она перемещается от  $X$  до  $-\Phi$ . В данном случае изменения потока  $\Delta\Phi_x$  в сердечнике при намагничивании и перематывании равны.

Реакцию сердечника непосредственно на воздействие намагничивающего тока не фиксируют, а определяют только изменение потока в сердечнике при воздействии перемещающего импульса тока. Для непосредственного определения изменения потока импульс э. д. с. с обмотки сердечника подают на вход усилителя-интегратора, в качестве которого могут быть использованы электронные или полупроводниковые  $RC$ -интеграторы активного типа. Применение последних позволяет получить высокую точность интегрирования при малой частотной погрешности. При одном и том же входном сигнале и одинаковой погрешности интегрирования напряжение на выходе активного интегратора в  $K$  раз больше, чем на выходе пассивной интегрирующей цепочки ( $K$  — коэффициент усиления усилителя, входящего в активный интегратор). Это позволяет измерять малые потоки с большой точностью. Нижний предел измеряемых потоков для интеграторов

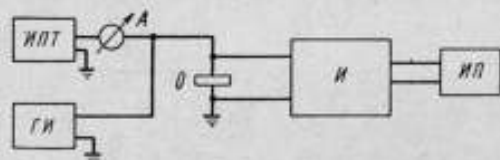


Рис. 3. Блок-схема установки для определения статической петли гистерезиса импульсным методом с электронным интегратором.

ГИ — генератор импульсов; ИПТ — источник постоянного тока, регулируемого по величине; O — испытуемый образец; И — интегратор; ИП — измерительный прибор.

активного типа определяется уровнем их собственных шумов и достаточен для большинства измерений. Исключение составляют измерения, проводимые на тонких магнитных пленках.

Сигнал с выходной обмотки испытуемого сердечника можно интегрировать и резонансным  $LC$ -контуром, что было предложено С. И. Тарасовым [2]. Однако на качество интегрирования импульса большое влияние здесь оказывает длительность импульса. Это обстоятельство весьма затрудняет использование резонансного контура в установках, предназначенных для измерения статических характеристик сердечников, так как процесс их статического намагничивания длится единицы и десятки миллисекунд. Пока не удалось найти удовлетворительного решения вопроса о применении интегрирующего  $LC$ -контура при статических измерениях.

Напряжение с выхода интегратора, пропорциональное изменению потока в сердечнике, подается к измерительному прибору — осциллографу или импульсному вольтметру. Предпочтительнее использовать осциллограф, так как погрешность измерения на нем амплитуд составляет  $\pm (3 \div 5) \%$ , тогда как импульсные вольтметры при больших скважностях имеют гораздо большую погрешность.

Изменяя величину постоянного намагничивающего тока, можно снять по точкам статическую петлю гистерезиса сердечника. Для получения более точных результатов амплитуда перемещающих импульсов должна изменяться так, чтобы оставалась неизменной разность

$$F_m - F_n,$$

где  $F_m$  — амплитуда перемещающей м. д. с.;

$F_n$  — постоянная м. д. с.

Однако подобная измерительная установка имеет довольно большую погрешность. Более высокую точность измерения потока можно получить, сравнивая площадь импульса на выходной обмотке испытуемого сердеч-

ника с площадью калиброванного импульса. Этот метод применяют в Ленинградском политехническом институте (ЛПИ). Калиброванные импульсы близки по своим параметрам к импульсам с выходной обмотки сердечника и вырабатываются специальным генератором (калибратором потока). Принцип действия генератора весьма прост. Калиброванные импульсы формируются при разряде точного конденсатора через измерительное сопротивление. Управление зарядом и разрядом конденсатора осуществляется транзисторным ключом. Площадь  $S$  выходного импульса генератора определяется напряжением заряда емкости  $\Delta U$ , сопротивлением  $R$  и емкостью  $C$ :

$$S = \Delta U RC.$$

Так как площадь импульса в вольт-секундах на выходной обмотке сердечника численно равна изменению потока в нем, то, применяя метод сравнения, можно вести отсчет потока по шкале прибора, контролирующего напряжение заряда емкости. С выхода генератора калиброванные импульсы поступают на интегратор, а затем на осциллограф.

Особенно удобно производить измерения в том случае, когда на осциллографе просматриваются одновременно два импульса, получаемых при интегрировании сигналов с выхода калибратора и с сердечника. Так как для этих сигналов измерительная цепь одна и та же, систематические погрешности компенсируются.

#### Приборы для измерения динамических характеристик сердечников

Время перемагничивания определяют в основном двумя методами [3, 4]. По первому методу сердечник перемагничивается прямоугольными импульсами тока, которые должны при этом удовлетворять следующим требованиям:

$$T_n \geq 5\tau_n;$$

$$T_f \leq 5\tau_n,$$

где  $T_n$ ,  $T_f$  — длительность перемагничивающего импульса и его фронта;

$\tau_n$  — время перемагничивания испытуемого сердечника.

Значение  $\tau_n$  определяют, наблюдая на экране осциллографа импульсы э. д. с. на измерительной обмотке;  $T_n$  получают на уровне 0,1 амплитуды (рис. 4).

Второй метод основан на тех же предпосылках, что и импульсный метод измерения статической петли гистерезиса. Блок-схема установки для измерения времени перемагничивания в данном случае аналогична изображенной на рис. 3, только источник постоянного тока, регулируемого по величине, заменяют здесь источником импульсов тока заданной длительности и регулируемой амплитуды. Эти импульсы, как и постоянный намагничивающий ток в установке для получения статической петли гистерезиса, переключают определенную часть потока сердечника (точка  $X$  на рис. 1).

Намагничивающий импульс тока заданной длительности увеличивается по амплитуде до тех пор, пока величина потока, определяемая при перемагничивании сердечника стандартными перемагничивающими импульсами тока, не достигнет  $0,95\Delta\Phi_m$  ( $\Delta\Phi_m$  — максимальная величина потока, переключающегося в сердечнике при перемагничивании его по предельной петле гистерезиса). Можно считать, что при этом длительность перемагничивания сердечника соответствует длительности намагничивающего импульса тока.

Преимуществом этого метода является большая точность, с которой можно получить при настройке установки калиброванные значения длительности намагничивающих импульсов тока. Кроме того, на такой установке можно определять ряд важных динамических характеристик сердечников: амплитуды импульсов на выходной обмотке и семейства петель гистерезиса, получаемые при перемагничивании прямоугольными импульсами определенной длительности. Установка такого типа разработана и успешно эксплуатируется в ЛПИ.

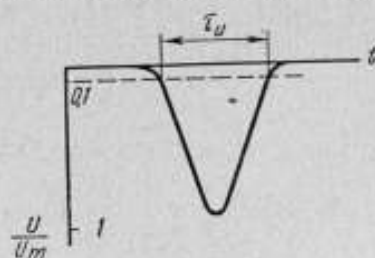


Рис. 4. Кривая импульса э. д. с. на измерительной обмотке испытуемого образца.

Использование метода сравнения для измерения переключающегося потока позволило снизить погрешность до  $\pm (2 \div 3) \%$ .

Приращение магнитного потока в динамическом режиме можно определить, применяя интегрирующий резонансный контур. Используя в этом случае упомянутый выше калибратор потока, площадь выходных импульсов которого регулируется напряжением заряда емкости, производят измерения компенсационным методом. В качестве чувствительного элемента служит колебательный контур, на который поступают импульсы с сердечника и калибратора. Синусоидальное напряжение на контуре усиливается, выпрямляется и подается как управляющее напряжение на калибратор. Применение автоматической компенсации для измерения магнитного потока позволяет не только повысить точность, но и значительно упростить процесс измерений.

#### Аппаратура для 100%-ного контроля сердечников

Так как магнитные свойства сердечника отражаются на форме и величине импульсов на его выходной обмотке при перемагничивании в различных полях, то годность сердечника можно определять, сравнивая импульсы образцового и испытуемого сердечников.

Если импульсы с выхода образцового и испытуемого сердечников одновременно просматриваются на экране осциллографа, годными считаются те сердечники, импульсы которых различаются в пределах установленных норм. Блок-схема установки, работающей по этому принципу, приведена на рис. 5.

Форма импульсов тока, вырабатываемых генератором импульсов, может быть различной: прямоугольной, треугольной, синусоидальной, трапецеидальной и т. д. Скорость нарастания тока (крутизна переднего фронта импульса) также различна. Часто перемагничивание целесообразно производить импульсами тока, близкими по форме тем, под действием которых сердечники работают в устройствах или элементах. Их значения должны быть достаточными для перемагничивания сердечников по предельной петле гистерезиса.

Образцовый и испытуемый сердечники пронизаны шиной; по ней проходят двухполярные намагничивающие импульсы, под действием кото-

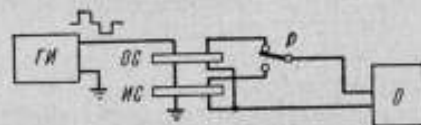


Рис. 5. Блок-схема установки, основанной на принципе сравнения импульсов образцового и испытуемого сердечников. ГН — генератор двухполярных импульсов тока; ОС и ИС — образцовый и испытуемый сердечники; Р — реле; О — осциллограф.

рых сердечники одновременно перемагничиваются. При этом на измерительных обмотках возникают импульсы э. д. с., которые через контакты реле поочередно подаются на вход осциллографа.

Если контакты реле с определенной частотой переключаются из одного положения в другое, то на экране осциллографа можно наблюдать одновременно импульсы э. д. с. образцового и испытуемого сердечников (примерный вид импульсов показан на рис. 6).

В ЛПИ спроектированы, изготовлены и успешно эксплуатируются установки, работающие по описанному выше принципу. Сердечники перемагничиваются двухполярными импульсами. Если перемагничивающий ток  $I$  (рис. 6) нарастает плавно, то момент начала импульса э. д. с. характеризует одновременно м. д. с., при которой начинается резкое изменение потока в сердечнике (м. д. с. старта), и динамические свойства сердечника. Площадь импульса э. д. с. характеризует изменение этого потока, а его длительность — динамические свойства. Достоинством таких установок является их простота, легкость выполнения, настройки и эксплуатации. Основной недостаток — большая погрешность измерений  $\pm (5 \div 7\%)$ .

Более точен метод встречного включения измерительных обмоток испытуемого и образцового сердечников, когда годность сердечника оценивается по полученной разности напряжений. Для более полного определения всех свойств сердечников перемагничивание должно осуществляться импульсами тока, следующими по определенной программе. Установка (неавтоматическая), работающая по описанному принципу, успешно функционирует в Московском энергетическом институте. Этот метод дает возможность осуществить полную автоматизацию процессов измерения.

Недостатками любого метода, где используют образцовые сердечники, являются трудности их подбора, а также добавочная погрешность, вызванная различием свойств этих сердечников. Кроме того, трудно производить деление сердечников на группы, что не дает возможности использовать большее их количество из партии. Измеряя в абсолютных величинах одновременно несколько существенных их параметров, можно избавиться от образцовых сердечников и осуществить деление сердечников на группы. После определения годности и группы сердечника по каждому из параметров соответствующие сигналы должны поступить на логическую схему, где вырабатывается сигнал, направляющий сердечник в бункер определенной группы.

### Заключение

Существует большое количество разнообразной аппаратуры и методов измерения, положенных в основу конструирования различных установок. Желательно ввести стандартные приборы для каждого из перечисленных выше назначений. Для измерения статической петли гистерезиса следует взять за основу одну из ныне действующих установок, использующих импульсный метод. Метод оценки разности напряжений на измерительных

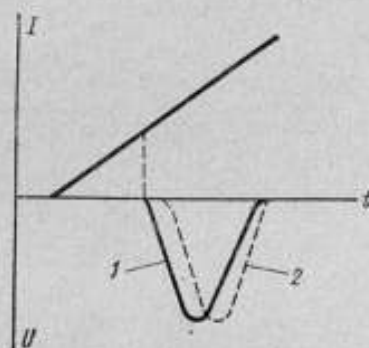


Рис. 6. Импульсы э. д. с. на измерительных обмотках испытуемого (1) и образцового (2) сердечников и прямая нарастания тока  $I$  в функции времени.

обмотках образцового и испытуемого сердечников можно считать наиболее целесообразным при конструировании стандартного автомата.

Наиболее спорным является вопрос о принципах построения установки для определения динамических параметров. Описанный выше метод оценки параметров сердечника при воздействии перемещающего импульса и намагничивании калиброванными по длительности импульсами имеет ряд преимуществ. К ранее перечисленным преимуществам надо добавить возможность совмещения в одной установке измерений статических и динамических параметров. Для этого достаточно, как уже указывалось, применять для намагничивания либо постоянный ток, либо импульсы калиброванной длительности. Источник перемещающих импульсов и измерительная часть в этих двух случаях могут быть неизменными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дирогов А. И., Шамаев Ю. М. Магнитные сердечники с прямоугольной петлей гистерезиса. М.—Л., «Энергия», 1964.
2. Тарасов С. И. Резонансный способ измерения приращений потока магнитной индукции при импульсном перемещении сердечников. «Труды Вычислительного центра АН СССР», М., Изд. ВЦ АН СССР, 1964.
3. James R. H., Overn W. M., Lundberg C. W. Flux distribution in ferrite cores under various modes of partial switching. «J. appl. phys. suppl.», 1961, v. 32, March.
4. Chen T. C., Paroulis A. Terminal properties of magnetic cores. Proc. IRE, 1958, v. 46, № 5.



## МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ ЗАДАННОГО ИМПУЛЬСНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### Особенности импульсного намагничивания в режиме заданного напряжения

В отличие от запоминающих и переключающих устройств с магнитными элементами, где процессы определяются формой импульса тока, практически не зависящего от параметров нагрузки, многие импульсные устройства (например, трансформаторы) работают в условиях с заданным напряжением в соответствии с требуемым изменением магнитного потока. В простейшем случае импульс напряжения э. д. с. имеет форму, близкую к прямоугольной, и поток индукции во время намагничивания  $t$  изменяется линейно:

$$B(t) \approx B(0) + \frac{E_0 t}{S\omega}, \quad (1)$$

где  $B(0)$  — индукция в момент появления импульса напряжения с амплитудой  $E_0$ ;

$S, \omega$  — площадь и число витков обмотки.

При периодическом повторении импульсов э. д. с. происходит формирование замкнутого частного цикла перемагничивания, что приводит к появлению разряда накопленной энергии. Поэтому э. д. с., индуцируемая в измерительной обмотке, имеет характерный всплеск обратной полярности (рис. 1). Форма импульса э. д. с.  $e_2(t)$  зависит от параметров первичной цепи, и площади положительной и отрицательной составляющих равны

$$\int_0^T e_2(t) dt = S\omega_2 [B(T) - B(0)] = 0, \quad (2)$$

где  $T$  — период повторения импульсов индукции  $B(t)$ ;  
 $\omega_2$  — число витков вторичной обмотки.

Это обстоятельство имеет большое значение при оценке годности того или иного измерительного устройства для такого рода импульсных испытаний магнитных материалов.

При исследовании импульсных кривых намагничивания, проницаемости, потерь и т. д. приходится определять наибольшее приращение магнитной индукции  $\Delta B_m = B(\tau) - B(0)$  (где  $\tau$  — длительность импульса), интегрируя импульс э. д. с. и находя амплитуду соответствующего сигнала.

Импульс магнитного потока имеет далеко не прямоугольную форму, поэтому измерительное устройство должно быть пригодно для работы в диапазоне частот гораздо больших  $\tau^{-1}$ .

Рассмотрим случай, когда э. д. с.  $e_2$  изменяется во времени следующим образом:

$$e_2(t) = \begin{cases} E_0 e^{-\frac{t}{\theta}} & \text{для } 0 \leq t \leq \tau; \\ -E_0 \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\theta}}\right) e^{-\frac{t-\tau}{\theta}} & \text{для } \tau \leq t \leq T, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\theta$  — постоянная времени.

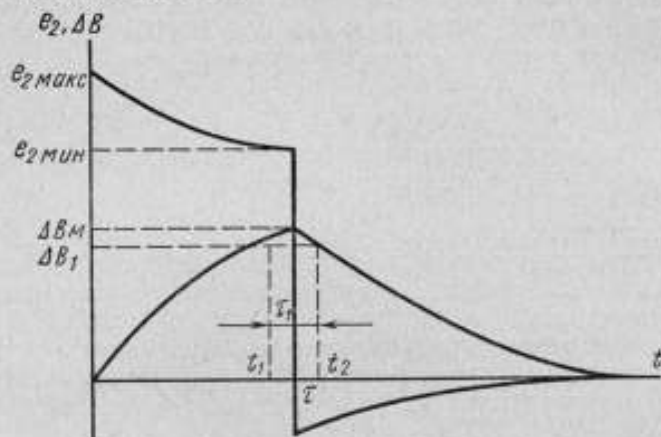


Рис. 1. Форма импульса э. д. с. в измерительной обмотке образца и импульса магнитной индукции  $\Delta B$ .

Если  $T - \tau \gg \theta$ , то можно показать, что  $\int_0^T e_2(t) dt = 0$ .

Магнитная индукция в этих условиях изменяется так:

$$B(t) - B(0) = \begin{cases} \frac{E_0 \theta}{S \omega_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{\theta}}\right) & \text{для } 0 \leq t \leq \tau; \\ \frac{E_0 \theta}{S \omega_2} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\theta}}\right) e^{-\frac{t-\tau}{\theta}} & \text{для } \tau \leq t \leq T. \end{cases} \quad (4)$$

Наибольшее приращение магнитной индукции равно

$$\Delta B_m = \frac{E_0 \theta}{S \omega_2} \left(1 - e^{-\frac{\tau}{\theta}}\right). \quad (5)$$

В рассмотренном идеализированном случае вершине импульса  $\Delta B(t)$  соответствует излом.

Реальные устройства могут определять амплитуду импульсов, имеющих конечную длительность. Предположим, что устройство позволяет измерять амплитуду импульсов длительностью, не меньшей  $\tau_1$ , что соответствует

$\Delta B_1$  (рис. 1). Связь между  $\tau_1$  и  $\Delta B_1$  можно установить из формулы (4). Так,  $t_1$  и  $t_2$  определяем из выражений:

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= \Theta \ln \left[ e^{-\frac{\tau}{\Theta}} + \delta \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\Theta}} \right) \right]; \\ t_2 &= \tau - \Theta \ln (1 - \delta), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\delta = \frac{\Delta B_M - \Delta B_1}{\Delta B_M}.$$

После преобразований формул (6) находим

$$\tau_1 \approx \delta \Theta, \quad (7)$$

если  $\tau \ll \Theta$ .

При  $\tau/\Theta = 0,05$  и  $\delta_1 = 1\%$   $\tau_1 = 0,2 \tau$ , т. е. длительность  $\tau_1$  в 5 раз меньше времени намагничивания  $\tau$ .

Аналогичные соотношения получают при оценке условий измерения амплитуды напряженности поля.

Материалы с непрямоугольной петлей гистерезиса намагничиваются в импульсном режиме, как правило, таким образом, что во время паузы напряженность импульсного поля убывает до нуля. Чтобы получить большой запас магнитной энергии для материалов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ), которым свойственна малая проницаемость  $\Delta B/\Delta H$ , сердечник подмагничивают постоянным током. В практике известны случаи, когда источник питания не имеет постоянной составляющей напряжения. Это позволяет создать двухполярные импульсы напряженности поля и увеличить динамическую проницаемость  $\mu_{дин} = \frac{\Delta B_M}{\Delta H_M}$ .

Независимо от вида применяемого материала импульсные процессы намагничивания достаточно полно характеризуются зависимостями  $\Delta B_M$  от  $H_M$  (или  $\mu_{дин}$  от  $H_M$ ) и потерь  $P$  от наибольшего приращения индукции  $\Delta B_M$ . Зависимость  $P = F(\Delta B_M)$  представляет интерес главным образом для мощных импульсных трансформаторов с большим выделением тепла, а также для магнитопроводов, работающих при малой скважности импульсов.

Приращение индукции  $\Delta B_M$ , как правило, определяют интегрированием э. д. с.  $e_2(t)$ . В случаях, когда требуемая точность измерений невелика и форма кривой  $e_2(t)$  близка к прямоугольной,

$$\Delta B_M = \frac{E_0 \tau}{S w_2}. \quad (8)$$

Отклонение формы импульса э. д. с. от прямоугольной может заметно повлиять на результаты измерения динамических характеристик, так как последние весьма чувствительны к скорости нарастания магнитного потока. В связи с этим наибольшее значение имеет величина спада импульса, характеризуемого относительной разностью э. д. с. (рис. 1):

$$\Delta e_0 = \frac{e_{2 \max} - e_{2 \min}}{e_{2 \max}}. \quad (9)$$

Чем больше индуктивность испытуемого образца, тем меньше  $\Delta e_0$ , поэтому до известного предела целесообразно увеличивать число витков в намагничивающей обмотке. Однако подобный прием не всегда позволяет добиться желаемого результата, особенно при малой длительности импульсов.

Применение многовитковой обмотки связано с появлением заметного емкостного тока, в результате чего иногда создаются высокочастотные колебания, резко искажающие условия намагничивания [1]. Особенно неблагоприятные условия возникают при испытании некоторых видов ферритов, имеющих высокую диэлектрическую проницаемость, так что в ряде случаев вместо намагничивания сердечника происходит явление, аналогичное возбуждению тороидального резонатора [2]. Кроме того, применение многовитковых обмоток требует высоковольтного источника импульсного напряжения. Так, подставив в формулу (8) числовые значения  $S = 0,5 \text{ см}^2$ ,  $\Delta B = 0,5 \text{ тл}$ ,  $\tau = 1 \text{ мксек}$ ,  $\omega = 100$ , находим, что  $E_0 = 2500 \text{ в}$ . Поэтому многие установки для определения импульсной проницаемости снабжают специальными высоковольтными генераторами [3—6]. Наилучшие условия для испытаний можно создать, используя намагничивающую секционированную обмотку [7, 8] с малым числом витков и генераторы импульсного напряжения с небольшим внутренним сопротивлением [9—10].

При однополярном намагничивании характер изменения э. д. с. при  $t > \tau$  оказывает определенное влияние на потери, так как скорость изменения потока во время «паузы» влияет на форму и площадь динамического цикла. Поэтому внутреннее сопротивление генератора должно быть известно в этом случае не только во время прохождения основного импульса, но и при обратном выбросе. Проницаемость  $\mu_{\text{дин}} = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m}$  определяется главным образом величинами, связанными с параметрами основного импульса э. д. с.

#### Определение амплитуды напряженности поля

Амплитуду напряженности магнитного поля  $H_m$  (или ее наибольшее приращение при двухполярном намагничивании) обычно определяют по максимуму падения напряжения  $U_r$  на активном сопротивлении  $r$ , включаемом последовательно с намагничивающей обмоткой:

$$H_m = \frac{U_r \omega_1}{rl}, \quad (10)$$

где  $\omega_1$  — число витков намагничивающей обмотки;  
 $l$  — длина магнитного пути.

Этот способ определения  $H_m$  сложен, так как сопротивление  $r$  должно быть небольшим, иначе форма импульса э. д. с. будет далека от прямоугольной. Поэтому для определения амплитуды напряженности поля требуются специальные безреактивные сопротивления, а также широкополосный усилитель. Последнее обстоятельство весьма осложняет применение типовой аппаратуры, так как полоса частот, соответствующая неизменному коэффициенту усиления, должна составлять десятки мегагерц. Правда, при определении кривой намагничивания или проницаемости скорость спада обратного выброса не имеет большого значения: достаточно лишь, чтобы цикл перемагничивания закончился к концу периода повторения импульсов. Поэтому намагничивающая цепь может быть, например, зашунтирована диодом, закрытым при прохождении основного импульса и открытым для выброса. Тогда скорость убывания потока снизится, а эквивалентная длительность напряжения импульсов  $U_r$  возрастет.

В настоящее время известно большое количество вольтметров, пригодных для измерения амплитуды импульсного напряжения; однако показав-

ния многих из них зависят от формы импульсов, скважности, длительности и частоты их повторения. Необходимо отметить, что погрешности подобных вольтметров обусловлены в ряде случаев видом применяемого индикатора. Так, показания амплитудного диодного (или пентодного) компенсационного вольтметра [11—13] зависят от перечисленных выше факторов, если компенсация определяется по гальванометру постоянного тока. Такой индикатор мало пригоден для определения амплитуд напряженности поля и индукции. Если использовать в качестве индикаторов амплитудные дискриминаторы, широко применяемые в ядерной физике [14, 15], то погрешности приборов будут определяться длительностью измеряемых импульсов. Следует отметить, что некоторые дискриминаторы пригодны для работы при длительности импульсов порядка единиц наносекунд [16]. Однако область применения вольтметров оказывается несравненно более

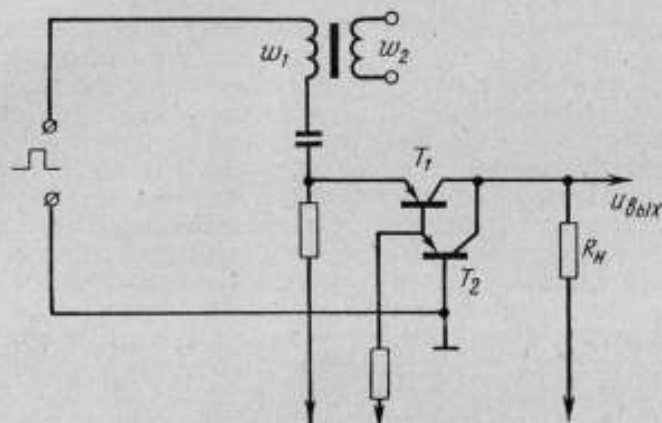


Рис. 2. Схема усилителя с общей базой.

узкой. Из-за проходной емкости диода (или пентода) наименьшее значение длительности импульсов составляет 0,1—0,2 мксек.

Известны также вольтметры, пригодные для определения амплитуд более коротких импульсов [17—21]. Необходимо отметить, что самыми удобными устройствами для магнитных измерений являются осциллопические, так как при длительности импульсов менее 0,1 мксек на их показания практически не влияют перечисленные выше факторы.

Недостатком таких устройств является сравнительно низкая чувствительность, что требует применения широкополосных линейных усилителей, так как падение напряжения на активном сопротивлении  $r$  должно быть небольшим. Это обстоятельство играет значительную роль при испытании образцов малой массы. Наиболее приемлемы для этой цели усилители:

- а) с распределенными параметрами, у которых предусмотрено снижение нестабильности коэффициента усиления [21];
- б) с импульсным питанием [22];
- в) на туннельных диодах [23].

В тех случаях, когда требуемая полоса частот усиления не превышает 7—10 Мгц, применяют обычные широкополосные усилители с глубокой отрицательной обратной связью [15].

Испытывая образцы малой массы, можно использовать составной триод  $T_1 - T_2$  в схеме с общей базой (рис. 2). Он позволяет довести падение напряжения на эквивалентном входном сопротивлении до 50—100 мв при рабочей полосе частот порядка десятков мегагерц [24]. Сила тока, проте-

кающего по сопротивлению  $R_{\text{н}}$ , с высокой степенью точности равна намагничивающему току. Это позволяет правильно преобразовать входной сигнал и получить коэффициент усиления, равный нескольким десяткам, что вполне обеспечивает надежность работы полупроводниковых компенсационных схем [25]. Недостатком такого усилителя является необходимость применения разделительного конденсатора, вследствие чего намагничивающий ток не содержит постоянной составляющей. Этот недостаток не имеет существенного значения в том случае, если образец испытывают при высокой скважности импульсов э. д. с. или в условиях отсутствия постоянной составляющей тока.

#### « Определение наибольшего приращения магнитной индукции

Наибольшее приращение индукции при импульсном намагничивании определяют главным образом интегрированием э. д. с., индуктированной во вторичной обмотке, с последующим измерением импульсным вольтметром наибольшего значения выходного напряжения интегратора.

Интеграторы могут быть основаны на использовании усилителей или пассивных цепей. В первом случае легко получить требуемое усиление э. д. с. одновременно с интегрированием, большую постоянную времени и низкое выходное сопротивление, что облегчает связь интегратора с вольтметром. Преимущество применения пассивных цепей заключается в том, что погрешность интегрирования не зависит от параметров усилителя. Пассивные интеграторы используют, как правило, при испытаниях магнитных материалов, когда импульсное напряжение, подаваемое на образец, составляет сотни, а то и тысячи вольт. Активные интеграторы применяют при испытании образцов малой массы.

Большинство интегрирующих устройств имеет существенный недостаток: у них отношение сигнал — шум на выходе меньше, чем на входе. Это объясняется тем, что для части спектра шумов сопротивление принимаемого конденсатора оказывается очень большим для частот и малым для диапазона, соответствующего интегрируемому импульсу.

Чтобы избежать погрешностей при проектировании усилителей, очень важно учесть отношение сигнал — шум на выходе. Способы расчета усилителя и выбора оптимальных его параметров приведены в работе [26], однако они непригодны для импульсов длительностью в доли микросекунды.

В настоящее время известен ряд схем, позволяющих интегрировать напряжение усилителями с большим коэффициентом усиления [27, 28]. Наиболее пригодными для импульсных испытаний являются такие схемы, у которых вход и выход имеет общий заземленный зажим. Однако помимо выбора схемы большое значение имеют ее параметры и прежде всего время запаздывания сигнала, проходящего тракт усиления. В отличие от испытаний материалов с прямоугольной петлей гистерезиса (после завершения перемагничивания магнитное состояние сердечника остается неизменным вплоть до окончания импульса тока) в данном случае магнитный поток изменяется непрерывно не только при прохождении основной части импульса э. д. с., но и после его окончания, когда формируется обратный выброс.

Широкополосные усилители, применяемые в интеграторах, не имеют постоянной составляющей на выходе, поэтому наибольшее приращение магнитной индукции определяют амплитудой выходного напряжения положительной и отрицательной полярности. Это необходимо учитывать при создании амплитудного вольтметра, который должен определять напря-

жения любой полярности. Исключение составляют измерения амплитуды импульсов, имеющих большую скважность, при однополярном намагничивании, когда сигнал одной из полярностей на выходе интегратора будет пренебрежимо малым.

Если допустимо время запаздывания сигнала порядка 0,1 мксек в тракте усиления, то для интегрирования могут быть использованы широкополосные усилители с отрицательной обратной связью, осуществляемой так же, как у обычных операционных усилителей [27—30].

Следует отметить, что активные и пассивные интеграторы на  $rC$ -элементах не являются единственно возможными. Уравнение движения подвижной части веберметра или баллистического гальванометра не совпадает с линейным дифференциальным уравнением, описывающим интегрирование, а поэтому нет необходимости требовать таких же свойств от импульсных интеграторов, если последние предназначены для определения наибольшего приращения магнитной индукции.

Это обстоятельство отметил А. И. Пирогов\*, предложивший использовать для интегрирования ряд цепей, в том числе и резонансные [23], имеющие преимущества по сравнению с применявшимися до сих пор, в частности лучшее соотношение между амплитудами полезного сигнала и шума. Однако при определении амплитуды индукции в режиме заданной (прямоугольной) э. д. с. резонансные цепи не всегда можно использовать непосредственно. Дело в том, что максимум напряжения на выходе таких интеграторов наступает по окончании короткого импульса, аналогично наибольшему отклонению подвижной системы баллистического гальванометра или веберметра.

Несмотря на это некоторые резонансные контуры пригодны для улучшения отношения сигнал — шум. Схема интегратора, позволяющего получить на выходе напряжение с улучшенным отношением сигнал — шум, приведена на рис. 3.

Нетрудно показать, что при достаточно большой индуктивности  $L$  напряжение на выходе интегратора  $U_{\text{вых}}$  зависит от входного  $U_{\text{вх}}$  следующим образом:

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{K_n}{Cr_k} \int_0^t U_{\text{вх}}(t') dt', \quad (11)$$

где  $K_n = \frac{sr_k}{1+sr_k}$  — коэффициент передачи катодного повторителя;  $s$  — крутизна триода каскадного усилителя.

Погрешность интегрирования импульсов, вызванная ограниченной величиной индуктивности  $L$ , шунтирующей емкостью  $C$ , для импульсов прямоугольной формы равна

$$\Delta_a = \frac{\tau^2}{6Lc}. \quad (12)$$

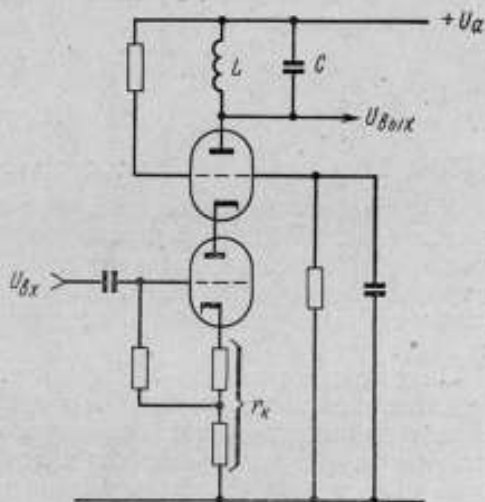


Рис. 3. Схема интегратора.

\* См. стр. 108—117.

Включением активного сопротивления последовательно с катушкой индуктивности достигают нужного режима разряда конденсатора.

Отношение  $q$  амплитуд полезного сигнала  $U_1$  к шумовому  $U_2$  на выходе

схемы к аналогичным величинам  $\frac{U_1'}{U_2'}$  на входе равно

$$q = \frac{U_1}{U_2} : \frac{U_1'}{U_2'} = \frac{6\Delta_2}{\omega_m}, \quad (13)$$

где  $\omega_m$  — круговая частота синусоидального шумового сигнала.

Если в схеме (рис. 3) вместо индуктивности  $L$  включить активное сопротивление  $r_a$ , то

$$q' = 2\Delta_2', \quad (13a)$$

где  $\Delta_2' = \frac{\tau}{2r_a C}$  — погрешность интегрирования.

При  $\Delta_2 = \Delta_2' \frac{q}{q'} \gg 1$ , так как  $\omega_m \tau \ll 1$ .

Из сказанного выше следует, что в подобной схеме не только индуктивность, но и любой другой двухполюсник (в том числе и активный фильтр), полное сопротивление которого достаточно велико на частотах, соответствующих спектру импульса, и мало для составляющих спектра шумов, вполне пригоден для создания интеграторов с большим отношением сигнала к шуму.

Следует отметить, что помимо интегрирования э. д. с. и последующего определения амплитуды сигнала с помощью описанных ранее вольтметров амплитуду индукции иногда определяют по наибольшему значению э. д. с., если форма ее импульса близка к прямоугольной [7]. Для этого используют соотношение (8). Но в данном случае необходимо определить еще и длительность импульса  $\tau$ , что представляет довольно сложную задачу. Современные измерительные устройства позволяют определять длительность импульсов с погрешностью порядка нескольких наносекунд. Для снижения этой погрешности в несколько раз применяют так называемые трансформаторы времени [31] с последующим измерением импульса большой длительности. Этот способ непригоден при малой скважности импульсов, однако и в других случаях следует с большой осторожностью относиться к оценке точности измерений, так как форма импульса э. д. с. практически никогда не бывает строго прямоугольной.

Неопределенность условий измерения, вызванная влиянием переднего и заднего фронтов, может быть практически устранена, например, при использовании генераторов, формирующих импульс с помощью линии и разрядника. Однако такие устройства создают сигнал с неудовлетворительной формой «плоской» части. В этом случае трудно оценить относительную разность между измеренным значением амплитуды импульса и тем, которое входит в равенство (8). Как правило, эта разность не меньше 5—7%, поэтому подобный способ пригоден лишь для сравнительно грубых измерений. Вместе с тем определение амплитуды индукции таким способом не снижает требований к импульсному амплитудному вольтметру, так как последний должен измерять пиковое значение падения напряжения, пропорциональное напряженности поля. Поэтому для определения импульсной кривой намагничивания наиболее удобна установка, структурная схема которой представлена на рис. 4.

К импульсному генератору 1 с малым внутренним сопротивлением подключают намагничивающую обмотку испытуемого образца 2 и небольшое активное сопротивление 7. Напряжение с вторичной обмотки образца



подается на интегратор 4, так что наибольшее приращение магнитной индукции может быть определено по показаниям амплитудного вольтметра 5. Амплитуду напряженности поля можно найти по напряжению на выходе усилителя 6, подключенного к активному сопротивлению 7. Так как импульсная проницаемость зависит от длительности импульсов, то последнюю определяют с помощью соответствующего измерителя 3, подключенного к вторичной обмотке. Такой способ включения прибора не единственно возможный.

Измеритель длительности импульсов можно также подключить к выходу генератора 1 или сопротивлению 7, однако полученные таким образом величины будут, как правило, отличаться друг от друга. Дело в том, что динамический цикл, соответствующий импульсному намагничиванию, обычно имеет закругленные вершины, так что максимум напряженности поля наступает раньше, чем индукции. Поэтому длительность импульса падения напряжения на сопротивлении 7 будет меньше соответствующего значения э. д. с., индуцируемой во вторичной обмотке образца. Очевидно, что длительность импульса напряжения, получаемого от генератора 1, будет больше длительности импульса падения напряжения на сопротивлении 7, но меньше длительности импульса э. д. с., индуцируемой во вторичной обмотке образца. Поэтому следует указывать не только длительность импульса, но и условия его определения.

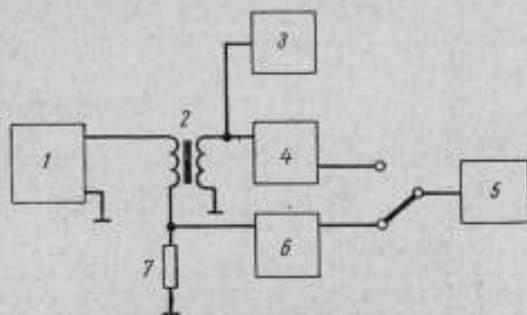


Рис. 4. Структурная схема установки для определения импульсной кривой намагничивания.

Другие виды импульсных магнитных испытаний

### Другие виды импульсных магнитных испытаний

Применение усилителей и интеграторов позволяет осциллографировать динамические петли и таким образом определять их параметры [8]. Электронно-лучевую трубку можно также использовать для быстрого определения импульсной проницаемости [7]. Для этого образец намагничивают серией импульсов, имеющих вид синусоидальных полувольт. Это дает возможность по времени установления остаточной индукции оценить вязкость материала, а также сравнить между собой характеристики разных материалов.

Используя калориметр и один из приведенных выше способов определения наибольшего приращения магнитной индукции, можно определять потери на перемагничивание [8]. Следует отметить, однако, что в настоящее время потери измеряют лишь на готовых изделиях, свойства же магнитопровода не определяют.

### Заключение

Разработанные методы магнитных испытаний в импульсном режиме при заданной форме э. д. с. еще недостаточно полно решают задачи, связанные с использованием магнитных материалов. Так, большие трудности возникают при определении проницаемости материалов для малой скважности импульсов небольшой (менее 0,2—0,3 мксек) длительности, малой массы образцов. Нельзя считать достаточно отработанной методику и аппа-

ратуру для определения потерь в импульсном режиме. Отсутствуют дифференциальные установки, позволяющие оценивать магнитные свойства испытуемых образцов по характеристикам нормальных.

Затруднения вызывает также отсутствие серийно выпускаемой аппаратуры (амплитудных вольтметров, показания которых не зависели бы от формы сигналов малой длительности и скажности; безреактивных сопротивлений, интеграторов и т. д.). Было бы целесообразно, чтобы одно из предприятий страны освоило серийный выпуск установок для определения импульсной проницаемости.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цыкин Г. С. Трансформаторы низкой частоты. М., «Радио», 1956.
2. Де-Бройль Л. Волноводы и резонаторы. М., ИЛ, 1951.
3. Elder T., Barte W. «Rev. sci. instrum.», 1962, v. 33, № 12, p. 53.
4. Melville W. S. Proc. Inst. Elect. Eng. 1950, v. 97, № 56, p. 11.
5. Käs G. Electron Rundschau, 1961, v. 11, № 15, s. 517.
6. Reeser G. A. «Electronics», 1961, v. 36, № 34, p. 72.
7. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М., Физматгиз, 1960.
8. Вопросы радиолокационной техники, т. II. Сб. переводов под ред. Брейтбарта. М., «Радио», 1949.
9. Эдукайтис Д. Ю., Баранускас К. И. «Приборы и техника эксперимента», 1962, № 6, стр. 88.
10. Стивенс Н. Б. «Приборы для научных исследований», 1964, № 2, стр. 42.
11. Момот Е. Г. Радиотехнические измерения. М., «Радио», 1958.
12. Албрехт А., Ленди Р. и Дэвис Д. Справочник радионинженера. ИЛ, 1960.
13. Лифшиц А. С., Дедок И. А. «Измерительная техника», 1959, № 10, стр. 26.
14. Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. М.—Л., Гостехиздат, 1955.
15. Санин А. А. Электронные приборы ядерной физики. М.—Л., Физматгиз, 1963.
16. Righini N. J. Nuclear Instrum. a Methods, 1964, v. 29, № 1, p. 89.
17. Грязнов М. М. Измерение амплитуды коротких импульсов. Сб. докладов Научной сессии НТО РЭ им. А. С. Попова. М.—Л., «Радио», 1959.
18. Льюис И. и Уэлс Ф. Миллимикросекундная импульсная техника. М., ИЛ, 1960.
19. Harbert L. M., Fresser J. A. «Wireless Eng.», 1955, v. 32, № 7, p. 187.
20. Agoieridis D. C. «Rev. sci. instrum.», 1962, v. 33, № 12, p. 1396.
21. Неустров А. С. «Измерительная техника», 1964, № 4, стр. 53.
22. Гасанов А. М. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 4, стр. 186.
23. Моругин Л. А. и Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. М., «Радио», 1963.
24. Chirlian J. K. «Proc. Inst. Radio Eng.», 1960, № 6, p. 115; Moody N. F., Wacker A. G. «Proc. IRE», 1961, № 4, p. 835.
25. Stiffard B., Tomlinson G. H. «Proc. IEE Electronics Record», 1965, v. 112, № 6, p. 1091.
26. Арменский Е. В., Жирков В. Ф., Рыбин В. М. «Измерительная техника», 1964, № 12, стр. 35.
27. Lange H., Kempen H. «Zs. angew. Phys.», 1963, v. 16, № 5, p. 342.
28. Фельдбаум А. А. Теория систем автоматического регулирования. М.—Л., Оборонгиз, 1956.
29. Келлер Р. «Приборы для научных исследований», 1964, № 8, стр. 131.
30. Ogney H. J. «Rev. sci. instrum.», 1960, v. 31, p. 701.
31. Гордиенко А. И., Иогансон А. А. «Приборы и техника эксперимента», 1962, № 6, стр. 77.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК

С исследованием тонких магнитных пленок (ТМП) связано в настоящее время одно из основных направлений развития теории магнетизма и техники магнитных измерений. Поэтому необходимо изучать свойства пленок, вызванные особенностями их доменной структуры, и ряд других наблюдаемых в них явлений.

Магнитные пленки все большее применение находят в быстродействующих вычислительных машинах [1—7]. Особые свойства пленок проявляются при толщине от десятков до тысяч ангстрем ( $1\text{ \AA} = 10^{-10}\text{ м}$ ). Площадь применяемых в технике образцов колеблется от долей квадратного миллиметра до  $1\text{—}2\text{ см}^2$ . Следовательно, объем ферромагнитного вещества и связанный с ним магнитный поток очень малы. Все это потребовало существенного повышения чувствительности обычных методов исследования магнитных материалов, а иногда и создания новых методов. В настоящее время необходима их систематизация, сравнительная оценка и выработка единых рекомендаций.

### Экспериментальные методы исследования тонких магнитных пленок

**Статические магнитные измерения.** Для исследования ТМП в статических условиях применяют в основном крутильные магнитометры различной конструкции. Они реагируют на крутящий момент, действующий на однородно намагниченную пленку во внешнем однородном поле. Ось вращения может лежать в плоскости пленки или быть к ней перпендикулярна. В первом случае можно измерять намагниченность насыщения  $J_s$  и статические кривые намагничивания образца; если же ось перпендикулярна к плоскости, то определяют анизотропию образца в его плоскости. Приборы с таким расположением оси называют анизометрами.

Вращающий момент, действующий на пленку, измеряют различными способами. Например, можно измерять некомпенсированное отклонение образца магнитным полем или компенсирующий момент, необходимый для возврата образца в исходное положение [8—14]. Более высокая чувствительность обеспечивается при неподвижных намагничивающих катушках и компенсации отклонения пленки полем, нормальным к ее плоскости [15]. Электростатическая компенсация [16, 17] позволяет упростить подвижную систему анизометра и уменьшить некоторые погрешности. Требуемую чувствительность можно характеризовать тем, что на-

пряженность поля  $100 \text{ а/м}$ , нормального к однородно намагниченной в своей плоскости пермаллоевой пленке толщиной  $10^{-7} \text{ м}$  ( $1000 \text{ \AA}$ ) и площадью  $1 \text{ см}^2$ , вызывает вращающий момент, равный  $10^{-6} \text{ н}\cdot\text{м}$ . Первые магнитометры для пленок несмотря на сложность их конструкции характеризовались постоянной по вращающему моменту порядка  $10^{-4} \text{ н}\cdot\text{м}$ . В настоящее время постоянная достигает  $10^{-9} \text{ н}\cdot\text{м}$  [13], что, по-видимому, является пределом, поскольку с увеличением ее возрастает роль паразитных моментов.

Наиболее просты и имеют хорошую точность магнитометры, работающие по принципу крутильных колебаний [18—21]. В них, как и в абсолютном методе Гаусса определения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, используют зависимость периода крутильных колебаний магнита (пленки), подвешенного на нити, от его магнитного момента и напряженности внешнего поля. Измерения сводятся к определению механических величин — размеров и веса образца (или тела инерции), а также времени. Прибор не нуждается в специальной градуировке. Недостатки метода — относительная длительность каждого измерения, рост погрешностей при слабых полях, трудность получения кривых намагничивания на самописце.

В работе [22] описан метод статических измерений пленок, основанный на электромагнитном взаимодействии образца с измерительной катушкой. Этот метод используют при измерении пленок вибрационным магнитометром. Образец вибрирует с частотой  $90 \text{ гц}$  во внешнем однородном поле. В неподвижной измерительной катушке возникает э. д. с., пропорциональная магнитному моменту образца. Высокий порог чувствительности ( $5 \cdot 10^{-13} \text{ вб}$ ) прибора позволяет исследовать как предельную петлю гистерезиса, так и частные циклы намагничивания.

Статические методы дают наиболее точное и строгое определение таких фундаментальных характеристик пленок, как намагниченность насыщения, коэрцитивная сила и др. Технические измерения обычно производят другими методами, по сравнению с которыми статические имеют ряд недостатков. Это относительная сложность магнитометров, трудность быстрого испытания большого числа образцов и невозможность в настоящее время исследовать с их помощью отдельные элементы в запоминающем устройстве. Однако и при технических измерениях применяют статические методы, так как они позволяют надежно градуировать радиотехнические измерительные устройства. Сравнение статических петель гистерезиса с наблюдаемыми на осциллографических установках позволяет оценить качество измерения феррографом важных параметров петли (особенно ее прямоугольности и квадратности).

**Осциллографическое исследование пленок на низких частотах.** Одним из первых приборов для исследования магнитных свойств пленок можно назвать феррограф — осциллографическое устройство для снятия петли гистерезиса пленок. В настоящее время этот прибор широко распространен [4, 5, 23—25]. Он позволяет быстро определять форму петель гистерезиса при различных магнитных воздействиях и другие параметры пленок.

Трудности осциллографирования характеристик ферромагнитных материалов значительно возрастают в случае испытания ТМП. Сцепленный с пленкой магнитный поток близок к  $10^{-9} \text{ вб}$  при толщине ее  $10^{-7} \text{ м}$  ( $1000 \text{ \AA}$ ) и ширине  $1 \text{ см}$  и соответственно меньше у образцов меньших размеров. Пленки с прямоугольной петлей гистерезиса перемагничиваются за очень короткий промежуток времени, поэтому сигнал, подлежащий интегрированию и усилению, содержит много высших гармоник.

Частоту перемагничивающего поля выбирают от 50 до 2000 *гц*. С увеличением ее усиливается полезный сигнал и облегчается подавление низкочастотных шумов ламп. Однако высшие гармоники сигнала могут приблизиться к резонансной частоте измерительной катушки, а амплитуда импульсов э. д. с. выйти за пределы линейности усилителя.

Потокоцепление измерительной катушки с пленкой меньше, чем с перемагничивающим полем. Необходима точная компенсация э. д. с., непосредственно наводимой данным полем. Для этого измерительную катушку, в которую вставлен образец, включают встречно с такой же катушкой без образца, находящейся в том же переменном поле. Для этой же цели используют и более сложные устройства [5, 23].

Если не требуется высокая чувствительность, измерительная катушка может состоять из одного витка, который навивают на пленку или располагают таким образом, чтобы в нем наводилась э. д. с., вызванная только нормальной к пленке составляющей ее поля рассеяния (катушка в форме восьмерки) [5, 23]. В последнем случае образец не вставляют внутрь витка, а накладывают на него. Это удобно при исследовании пленок, нанесенных на массивные подложки, а также в процессе напыления. Такая катушка имеет большее отношение сигнала к шуму, чем намотанная вокруг образца, но при этом появляется ошибка, вызванная неоднородностью поля пленки [15]. Форма многовитковой катушки также влияет на отношение сигнала к шуму [23]. Число ее витков выбирают от 100 до 5000.

Коэффициент усиления в феррографах для пленок достигает  $10^6$ . Одна из трудностей состоит в подавлении фазовых искажений. Постоянная феррографов по потоку достигает  $10^{-9}$  *вб* при одновитковой катушке и  $10^{-12}$  *вб* при многовитковой [23]. Этого достаточно для исследования пленок толщиной порядка десятков ангстрем [26].

Масштаб петли по горизонтальной оси определяют сравнительно просто, а по вертикальной — значительно сложнее. При однослойной катушке из-за малой толщины ТМП практически можно считать, что пленка сцеплена только с той частью витков, которая непосредственно на нее проецируется. Несмотря на возможность аналитического подхода к расчету потокоцепления [5, 7, 27, 28] определять его расчетным путем сложно. Причина этого заключается в трудности доведения теоретического расчета до числового результата, а также в дискретном характере намотки и различии размеров реальной катушки от идеальной. Поэтому градуировать прибор следует по образцу с известным магнитным моментом. При одном витке возможна и непосредственная градуировка [23].

Форма петли гистерезиса, наблюдаемой на осциллографе, и ее характерные точки могут зависеть от частоты. Это вызывается как погрешностями измерительной системы, так и фактическим изменением петли под влиянием частоты [29, 30]. Поэтому следует всегда выяснять, в какой степени наблюдаемые петли совпадают со статическими.

Осциллографирование поперечной составляющей индукции дает дополнительные сведения о ходе технического намагничивания пленок [5]. Возможно также осциллографирование петель гистерезиса цилиндрических пленок (осажденных на проволоке) [31—33]. В этом случае на экране осциллографа наблюдают критическую кривую перемагничивания, которая у идеальной пленки имеет форму астроида, а у реальных может от нее отличаться [34].

При использовании более простых устройств, чем феррограф, часто наблюдают непроинтегрированный сигнал, возникающий при перемагничивании пленок. Так определяют, в частности, ряд параметров пленок, непосредственно влияющих на их работу в запоминающих устройствах [35]. При таких измерениях на пленку воздействуют импульсы

в определенной последовательности [36, 37]. Отсутствие интегрирующего звена и меньшие требования к амплитудно-фазовой характеристике обеспечивают большую чувствительность по потоку, чем у феррографов.

**Исследование доменной структуры пленок.** Магнитные пленки замечательны тем, что по толщине они имеют только один домен. Поэтому возможности их исследования по доменной структуре несравненно шире, чем у массивных образцов.

Доменную структуру исследуют порошковым методом, магнитооптическими, основанными на эффектах Керра и Фарадея, а также с помощью электронного микроскопа. Методом порошковых фигур (магнитной эмульсии) выявлены основные закономерности процессов технического намагничивания пленок [1, 38—41], изучены структура доменов при различных условиях намагничивания и особенности доменных границ в пленках. Преимущества этого метода в простоте оборудования и самой процедуры исследования. Однако он не обеспечивает решения всех задач, в частности не позволяет выявить некоторые типы доменных границ (Нееля), и непригоден для исследования быстрых процессов.

Как известно, магнитооптический эффект Керра основан на зависимости угла поворота плоскости поляризации света, отражаемого намагниченной поверхностью, от величины и направления намагниченности. Эффект Фарадея заключается в повороте плоскости поляризации света, прошедшего через намагниченное вещество. Угол поворота при отраженности света от пленки или прохождении через нее составляет 5—35°. Поворачивая анализатор и поляризатор, можно добиться того, что разница в освещенности изображений различных доменов будет пропорциональна разнице в направлении их намагниченности. Применение экваториального эффекта Керра, при котором плоскость поляризации света не изменяется, а его фаза и амплитуда зависят от направления намагниченности, описано в работе [42]. Эффект Фарадея применяют для исследования полупрозрачных пленок толщиной до  $5 \cdot 10^{-8}$  м (500 Å) [43—46]; эффект Керра — для более толстых пленок [1, 3, 47—50]. Разрешающая способность этих методов 1—3 мкм. Техника магнитооптических исследований непрерывно совершенствуется [51, 52].

Возможности магнитооптических методов расширяются, если фотоумножителями измерять интегральный световой поток [52—56]. Так можно снимать низкочастотные петли гистерезиса пленок при перемагничивании их переменным полем. Переменный световой поток, зависящий от магнитного состояния образца, преобразуется в электрический сигнал и поступает на вход вертикального отклонения осциллографа. Для горизонтальной развертки снимают напряжение с сопротивления, включенного последовательно с намагничивающими катушками. Здесь не возникают трудности, связанные с электрическим интегрированием, усилением очень слабых сигналов и фазовыми искажениями, как в случае исследования пленок на обычных феррографах. Такой метод наиболее удобен при температурных измерениях. Его чувствительность определяется параметрами (темновым током и чувствительностью) фотоумножителя и, как правило, достаточна для технических измерений.

Магнитооптические методы пригодны и для исследования быстропротекающих процессов намагничивания в пленках. Перспективно в этом отношении применение стробированных световых импульсов, синхронизированных с импульсами магнитного поля [57—59]. При стробировании с помощью электронной схемы частота повторения достигает  $10^6$  пер/сек [58], а с помощью вращающегося зеркала длительность световых импульсов на образце составляет 0,1 мксек. Доменную структуру пленок можно

наблюдать и фотографировать на различных стадиях импульсного перемагничивания.

Импульсное перемагничивание пленок можно исследовать также следующим методом. На пленку действуют последовательно разнополярные импульсы с частотой повторения 60 *имп/сек*. За относительно длительную паузу после воздействия положительного импульса фотоумножитель фиксирует, какая часть пленки перемагнитилась за время действия этого импульса. Таким методом определены зависимости времени перемагничивания пленок от импульсного поля, подобные соответствующим кривым, получаемым при обычных импульсных измерениях [60].

Для изучения магнитной структуры, процессов намагничивания и других свойств пленок широко применяют электронно-микроскопические методы [61—67].

**Измерение магнитной проницаемости.** Магнитная проницаемость представляет интерес не только сама по себе, но и в том отношении, что она позволяет определить другие параметры пленок. На низких частотах проницаемость можно определить по наклону петель гистерезиса. Чтобы найти мнимую ее часть, измеряют площадь петли частного цикла [68]. Это требует более высокой чувствительности осциллографических устройств, чем при обычном исследовании пленок. Поэтому такой метод вряд ли получит распространение.

Гораздо проще определять проницаемость по изменению комплексного сопротивления катушки, вызванному влиянием пленки. На частотах 0,3—5 *Мгц* удобен резонансный метод измерения индуктивности катушек с пленкой, в принципе подобный измерениям на куметре [27, 69, 70]. Возможно применение и других радиотехнических методов [2].

Из-за неопределенности коэффициента потокоцепления пленки с катушкой абсолютную величину проницаемости найти трудно. Проще построить в относительных единицах зависимости действительной и мнимой частей проницаемости от подмагничивающего поля при разных ориентациях подмагничивающего и радиочастотного полей. По этим кривым судят об общих свойствах пленок и о конкретных образцах. Зная проницаемость, можно определить коэрцитивную силу вращения  $H_k$ , амплитудную и угловую дисперсию и другие параметры, пользуясь простой измерительной схемой, которую можно собрать из типовой радиотехнической аппаратуры. Однако для исследования образцов с площадью в несколько квадратных миллиметров и менее необходима более сложная методика и аппаратура. Тем не менее исследование таким методом отдельных «пятен» в матрице — по-видимому, разрешимая задача.

**Исследование импульсного перемагничивания пленок.** Важнейшим свойством пленок, благодаря которым их применяют в вычислительной технике, является большая скорость перемагничивания.

В зависимости от величины и скорости нарастания перемагничивающего поля и других факторов пленки могут перемагничиваться за время от нескольких наносекунд до нескольких микросекунд. Этот процесс у реальных пленок сложен и трудно поддается числовому расчету. Поэтому время перемагничивания нужно измерять не только при научных исследованиях, но и при контроле технических устройств. Важны также форма и величина э. д. с., возникающей при перемагничивании пленки. Методика таких исследований в настоящее время хорошо разработана [1—3, 71—75].

Для перемагничивания пленок необходимы импульсы тока до 15—30 *а* с длительностью фронта  $\tau_f$  от нескольких десятых до единиц наносекунд. По-видимому, конечная скорость нарастания тока влияет на ход перемагничивания, когда  $\tau_f$  одного порядка с длительностью перемагничивания [76]. Этот вопрос еще мало изучен.

Требуемые импульсы получают при разряде заряженного коаксиального кабеля на ртутное реле [72] или последовательным их усилением с одновременным ограничением сигнала на электронных лампах [2]. Импульс подается в короткозамкнутую полосковую линию, внутри которой находится пленка. Витки съема сигнала и компенсации потока, замыкающегося по воздуху, позволяют измерить э. д. с., вызванную продольной и поперечной составляющими поля пленки при ее перемагничивании [72, 75]. Амплитуда э. д. с. в съемном витке — от нескольких милливольт до 1 в. Форма сигнала зависит от напряженности поля, а также от направления поля и съемного витка. Усиливаемый сигнал наблюдается на осциллографе.

Полной компенсации помех, возникающих в съемном устройстве, обычно не достигают. Поэтому, чтобы определить величину и форму чистого сигнала, вырабатывают приемы, позволяющие одновременно наблюдать на экране осциллографа сигнал с помехой и одну помеху [74]. За время перемагничивания принимают обычно время, в течение которого измеряемая э. д. с. будет больше 0,1 своей амплитуды. Диапазон частот измерительной системы должен быть не менее  $10^9$  гц. В противном случае на экране осциллографа будет наблюдаться не сигнал, вызванный непосредственно перемагничиванием пленки, а лишь кривая, характеризующая переходный процесс в измерительной системе. При исследовании пленок используют последние достижения скоростной осциллографии, в частности стробоскопический осциллограф [2, 72].

Следует ожидать, что по мере дальнейшего развития техники наблюдения быстрых сигналов будут выявлены более тонкие детали импульсного перемагничивания пленок.

**Исследование ферромагнитного резонанса.** Как известно, явление ферромагнитного резонанса заключается во взаимодействии связанной системы гироскопов — элементарных носителей магнитного момента, какими являются электронные спины, с высокочастотным магнитным полем. Если частота изменений поля близка к собственной частоте спиновой системы, наблюдается резкая частотная зависимость действительной и мнимой частей проницаемости, в частности сильный рост магнитных потерь. Теория и методика исследования этих явлений хорошо разработаны [77] и применимы к пленкам [3, 78—81].

Резонансные кривые обычно исследуют при фиксированной частоте в функции напряженности подмагничивающего поля  $H_0$ . Определяют такое значение  $H_0$ , при котором наблюдается резонанс на данной частоте  $f_p$  (или угловая частота  $\omega_p$ ), а также ширину резонансной кривой  $\Delta H$ . Под  $\Delta H$  понимают разницу между двумя значениями  $H_0$ , при которых поглощение равно половине максимального.

Для идеальной пленки при однородном вращении вектора намагниченности и подмагничивании ее вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) получены теоретически соотношения:

$$f_p = 3,53 \cdot 10^4 \sqrt{J_S (H_0 \pm H_k)}; \quad (1)$$

$$\Delta H = 3,20 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{\lambda f_p}{J_S} = 7,14 \cdot 10^{-7} f_p \alpha_0, \quad (2)$$

где  $J_S$  — намагниченность насыщения, а/м;  
 $\lambda$  и  $\alpha_0$  — коэффициенты, учитывающие затухание прецессии соответственно в уравнениях Ландау — Лифшица и Гильберта.

Знак плюс в скобках формулы (1) соответствует напряженности поля  $H_0$ , действующей вдоль ОЛН согласно с остаточной намагниченностью; минус — напряженности поля, антипараллельного остаточной намагничен-



ности, а также тому случаю, когда поле, большее  $H_k$ , действует вдоль оси трудного намагничивания (ОТН). Согласно формулам (1) и (2) собственный (при отсутствии внешнего поля) ферромагнитный резонанс будет наблюдаться у пленки с  $H_k = 320 \text{ а/м}$  (4 э),  $J_S = 6,5 \cdot 10^8 \text{ а/м}$  (индукция насыщения 0,82 тл, или 8200 гс) на частоте 510 Мгц. Для резонанса на частоте  $10^{10} \text{ гц}$  (длина волны 3 см) требуется подмагничивающее поле напряженностью  $1,23 \cdot 10^8 \text{ а/м}$ .

Зависимость резонансной частоты от подмагничивающего поля позволяет определять  $J_S$  и  $H_k$  [80, 82]. Одно из достоинств такого определения  $J_S$  состоит в том, что не нужно измерять отдельно толщину образца.

Долгое время формула (2) служила единственным критерием для получения  $\lambda$ .

На основании резонансных измерений можно исследовать ряд других свойств пленок [3], например дисперсию анизотропии и магнитную неоднородность пленок по толщине [81, 83]. При действии на пленку неоднородного радиочастотного поля связанные гироскопы-спины могут прецессировать в разных ее участках неоднородно, в частности несинфазно. Возникают сложные виды прецессии, известные под названием спиновых волн, связанные с дополнительными потерями энергии [3, 77]. Спиновые волны появляются иногда и в однородном поле в результате действия полей рассеяния на неоднородности пленки. По спиновым волнам определяют обменную постоянную  $A$ , важную для теории.

Ферромагнитный резонанс на частотах порядка  $10^{10} \text{ гц}$  и выше экспериментально исследуют с помощью полых резонаторов. По изменению резонансной частоты и добротности резонатора вычисляют действительную и мнимую части проницаемости пленки [3, 84]. На более низких частотах (до 20 Мгц) используют ту же аппаратуру, что и при импульсных исследованиях, возбуждая в измерительной системе и наблюдая соответствующие гармонические сигналы [80, 85]. В работах [86, 87] указывается на возможность наблюдения резонанса в пленках и при еще более низких частотах, что, по мнению авторов, ошибочно.

Важнейшие немагнитные свойства пленок (химический состав, толщина и электрические свойства). Наиболее точно толщину пленок определяют оптическими методами, основанными на наблюдении интерференции лучей, отраженных от пленки и подложки [88, 89], а также по интенсивности прошедшего излучения — видимого или рентгеновского [9]. Толщину пленки, превышающую  $10^{-8} \text{ м}$  (100 Å), можно определять, измеряя электросопротивление пленки [90, 91].

Толщину пленки определяют также по магнитному моменту при насыщении и ее известной площади. Намагниченность пленок из пермаллоя мало чувствительна к изменению их химического состава в пределах 1—2% [92]; последние можно гарантировать при установившейся технологии. Поскольку  $J_S$  при толщине пленок, по крайней мере, выше  $10^{-8} \text{ м}$  (100 Å) не зависит от нее и равна намагниченности насыщения массивного материала [3, 11], этот метод дает достаточно точные результаты.

Для определения состава пленок помимо обычных химических методов применяют полярографический, а также рентгеновский и микрорентгеновский анализы [7]. Иногда для выяснения вопроса, получен ли материал с нулевой магнитострикцией, исследуют зависимость свойств пленки от внешних механических сил [4]. При этом легко обнаруживают отклонение состава на несколько долей процента.

Электрические свойства пленок интересны, в частности, ввиду их связи с магнитными свойствами [3, 93—95]. Так, связь между электросопротивлением и распределением намагниченности позволила измерить зависи-

мость коэрцитивной силы никелевых пленок от частот в диапазоне 30— $10^4$  гц [29]. В случае ферромагнитного резонанса между краями пленки возникает постоянное напряжение. Оно может служить более чувствительным индикатором резонанса, чем измерение магнитных потерь [95]. Измеряя гальваномагнитные эффекты, определяют и поле анизотропии [2].

Часто для понимания свойств пленок требуется исследование их внутренних напряжений [96], а также действия на них внешних напряжений [2].

**Некоторые особенности магнитных испытаний пленок.** Пленки обладают высокой чувствительностью к магнитному полю. Поэтому необходим тщательный учет или компенсация посторонних полей, действующих на пленку. Это относится в первую очередь к земному магнитному полю. Неучтенное внешнее поле, даже малое по сравнению с коэрцитивной силой смещения и вращения пленки, может значительно изменить ее магнитное состояние, вид петли гистерезиса и характер импульсного перемагничивания. Постоянную составляющую посторонних полей можно скомпенсировать тремя парами катушек с ортогональными осями. Часто составляющую внешнего поля в плоскости пленки достаточно скомпенсировать полем одной пары катушек. Небольшое поле, нормальное к пленке, не влияет на нее из-за большого размагничивающего коэффициента в этом направлении.

Кроме земного на пленку могут действовать различные паразитные поля — постоянные, медленно изменяющиеся во времени, фон промышленной частоты, высокочастотные и импульсные наводки. При нерациональной компоновке измерительной схемы на образец влияют поля измерительных приборов и реостатов, недостаточно удаленных от него.

Известные методы автоматической компенсации паразитных полей [97] не обеспечивают полной защиты от них. Магнитные экраны из-за искажения рабочего поля и дополнительных емкостных связей иногда приводят к погрешности, большей, чем устраняемая. Как известно, единого метода избавления от наводок указать нельзя. Для устранения влияния низкочастотных наводок, например, применяют специальную подсветку луча осциллографа [36]. Случайных погрешностей можно избежать многократным повторением измерений. Это особенно целесообразно при статических измерениях и наблюдении доменных фигур. Если при одном измерении случайное внешнее поле вызывает определенное изменение магнитного состояния, то мала вероятность, что оно появится вновь при повторном измерении. Осциллографические методы наблюдения петли и импульсные измерения по повторяющейся программе менее подвержены случайным воздействиям. Получаемые при этом результаты являются усредненными по большому числу быстро повторяющихся циклов.

Важно правильно установить направление оси легкого намагничивания образца. Экспериментально его можно определить как направление, при котором время импульсного перемагничивания максимально [98] или при котором предельная петля имеет наибольшую квадратность.

Для пленок, как и для массивных ферромагнетиков, важно знать их магнитное состояние до исследования. Чаще всего исходным служит состояние остаточной намагниченности вдоль ОЛН. Оно однозначно характеризует образец и легко воспроизводимо. Кроме того, в таком состоянии обычно находятся пленки в запоминающих устройствах.

Необходимо также остановиться на вопросах градуировки измерительных устройств для пленок и нормального образца. Коэффициент потокоцепления пленки с катушкой точно рассчитать невозможно, так как в пленках наблюдаются процессы старения [99, 100]. Если при выборе соответствующего режима работы пленок в технических устройствах это

явление может не иметь существенного значения, то оно затрудняет создание нормальных образцов с длительным сроком работы. Поэтому целесообразно для градуировки других измерительных устройств пользоваться такими, которые в этом сами не нуждаются (абсолютный метод Гаусса [19]).

#### Методика определения некоторых параметров тонких магнитных пленок

Козерцивная сила вращения  $H_k$  — удобная расчетная величина, характеризующая анизотропию идеальной однородной пленки:

$$H_k = \frac{2K}{\mu_0 J_S},$$

где  $K$  — константа анизотропии первого порядка, Дж/м<sup>3</sup>;  
 $\mu_0$  — магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Она является важнейшим параметром в формулах для определения статических свойств идеальной пленки, времени ее перемагничивания и частоты ферромагнитного резонанса. Для реальных образцов, обладающих дисперсией (разбросом локальных значений) анизотропии по величине и направлению, понятие козерцивной силы вращения нуждается в уточнении. При этом нужно представлять, что, каким бы образом ни вводилось это понятие применительно к реальным образцам, оно не может здесь играть универсальной роли, присущей  $H_k$  в модели однородного вращения. Если учитывать только амплитудную дисперсию, то можно говорить о моде распределения (значение, соответствующее наибольшей плотности вероятности) или о среднем значении. Для несимметричных распределений, к которым относится и распределение  $H_k$  на отдельных участках пленки, среднее значение в общем случае не совпадает с модой. Кривую распределения плотности вероятности значений  $H_k$ , строго говоря, исследовать невозможно. Все известные методы ее построения не учитывают магнитостатического и обменного взаимодействия между участками. Физическая картина здесь чрезвычайно сложна. Однако для технических расчетов удобно иметь меру анизотропии той же размерности, что и напряженность поля. Здесь, по-видимому, придется иметь дело с несколькими разными величинами. Выбор той или иной величины должен зависеть от цели, для которой она вводится.

Так, частоту ферромагнитного резонанса определяет удельный возвращающий момент, действующий на намагниченность пленки при ее отклонении от направления статического равновесия на малый угол  $\theta$ . Для идеальной пленки этот момент равен  $\mu_0 H_k J_S \theta$ . Из этого соотношения можно определять  $H_k$  реальной пленки только в первом приближении, подставляя экспериментальное значение момента. Результат будет приближенным, так как из-за угловой дисперсии значение  $\theta$  несколько неопределенно. При обычной для пленок угловой дисперсии 1—3° можно воспользоваться средним значением  $\theta$ , совпадающим с углом между средним направлением намагниченности и осью анизотропии. Введенное таким образом значение  $H_k$  может быть получено измерением на анизометре и резонансными измерениями.

При однородном вращении  $H_k$  можно найти из соотношения

$$H_k = \frac{H_0 M_T}{M_S},$$

где  $H_0$  — напряженность малого поля, действующего вдоль ОЛН пленки, предварительно намагниченной вдоль ОЛН;

$M_S$  — магнитный момент пленки при насыщении;

$M_T$  — поперечная составляющая магнитного момента.

Таким образом, значение  $H_k$ , вычисленное расчетным путем при наличии угловой дисперсии, должно отличаться от полученного экспериментальным путем, но практически они совпадают. Именно эту величину измеряют по начальному наклону петель гистерезиса в направлении трудного намагничивания.

Результаты измерений  $H_k$  одних и тех же образцов разными методами неодинаковы, особенно при большой дисперсии. При выборе метода всегда нужно точно представлять себе, на какую физическую величину и на какой вид эффективного поля  $H_k$  он реагирует.

Статические измерения  $H_k$  анизометрами чаще всего производят следующим образом. На пленку параллельно ее плоскости действует магнитное поле напряженностью  $H$ , значительно большее  $H_k$  и направленное под углом  $\varphi$  к ее оси легкого намагничивания. При этом возникает крутящий момент  $T = KV \sin 2\theta$  ( $V$  — объем пленки;  $\theta$  — угол между намагниченностью и ОЛН). В сильных полях ( $H \gg H_k$ ) можно считать  $\theta = \varphi$ . Измерив максимальный момент в функции  $\varphi$ , найдем  $K$  [101]. Существование, что момент  $T$  максимален при  $\theta = 45^\circ$ , когда угловая дисперсия оказывает минимальное влияние на поведение пленки. Объем образца в этом случае не требуется определять отдельно, на магнитометре легко определить магнитный момент при насыщении  $M_S = J_S V$ . После этого получим

$$H_k = \frac{2T_{\max}}{\mu_0 M_S}.$$

Другие описанные в литературе методы определения  $H_k$  на анизометре менее достоверны. Они основаны на представлении об однородном вращении намагниченности, что в условиях их применения может не соблюдаться. На них больше влияют и неоднородности образцов [101, 102]. Неудобство применения метода крутящего момента состоит в том, что измеряемый образец должен иметь идеальную форму круга.

Чаще всего для определения  $H_k$  используют феррографы. При этом определяют наклон петли в слабом переменном поле, направленном вдоль ОЛН. Образец должен быть предварительно намагничен до насыщения вдоль ОЛН.

В модели однородного вращения петля вырождается в прямую с изломом при  $H = H_k$  и  $M = M_S$ . У реальных пленок прямолинейная зависимость наблюдается только при амплитуде переменного поля, не превышающей  $0,2-0,5 H_k$ . Эту прямую экстраполируют до пересечения с точкой  $M = M_S$ , абсциссу точки пересечения считают равной  $H_k$  [7].

У некоторых образцов даже в слабом поле петля несколько расширена, и направление касательной становится неопределенным. Тогда вдоль ОЛН создают добавочное поле  $H_0$ , совпадающее по направлению с остаточной намагниченностью. Величина его должна быть такой, чтобы поперечная петля на начальном участке превратилась в прямую линию. Абсцисса точки пересечения продолжения этой линии с линией  $M = M_S$  будет равна  $H_k + H_0$ .

Точность метода заметно снижается при измерении «обращенных» пленок, у которых коэрцитивная сила смещения  $H_{cm} > H_k$ , а также при  $H_k < 80 \text{ а/м}$  [103]. Теоретические и экспериментальные результаты, например [104], свидетельствуют о том, что и для «нормальных» пленок,

если при поперечном перемагничивании происходит перестройка доменной структуры (переход от блоховского типа границ к неелевскому), начальный наклон петли не может служить достоверным критерием для определения  $H_k$ . Значение  $H_k$ , измеренное по наклону петли, несколько меньше среднего значения  $H_k$  образца [37].

С помощью феррографов можно определять  $H_k$  и другими методами [105], например низкочастотными импульсными измерениями [35, 106]. Прямоугольные импульсы в этом случае действуют в направлении ОЛН, а подмагничивающее поле  $H_0$  — вдоль ОТН. Измеряют сигнал, наведенный в измерительной катушке, витки которой параллельны ОТН. Считают, что он максимален при  $H_0 = H_k$ . Нетрудно убедиться, что при малом импульсном поле здесь измеряют величину, пропорциональную дифференциальной проницаемости пленки. В простейшей модели проницаемость действительно максимальна при  $H_0 = H_k$  при такой ориентации полей [70]. Но амплитудная и угловая дисперсии сложным образом влияют на положение этого максимума [106, 107]. Иногда он наблюдается при значительно меньшей напряженности поля, что можно объяснить угловой дисперсией [69]. Этот метод нельзя считать достоверным.

Измеряя магнитную проницаемость пленок, можно также найти  $H_k$  различными способами.

Если подмагничивающее поле  $H_0$  направлено вдоль ОЛН, а слабое радиочастотное вдоль ОТН, то обратимая проницаемость определяется соотношением

$$\mu = \frac{B_S}{\mu_0 (H_0 + H_k)}$$

Непосредственное вычисление  $H_k$  по этой формуле затруднительно из-за неточности определения абсолютной величины  $\mu$  и необходимости определять отдельно  $B_S$ . Гораздо удобнее воспользоваться зависимостью в относительных единицах  $\frac{1}{\mu}$  от  $H_0$ , которая должна быть прямой линией, отсекающей на горизонтальной оси отрезок, равный  $H_k$ . По степени совпадения экспериментальных точек с прямой судят о точности измерений. Такой метод предпочтителен еще и потому, что при подмагничивании пленки уменьшается влияние дисперсии на проницаемость.

Значение  $H_k$  получают и при измерении высокочастотной проницаемости методом, описанным в работе [102]. Определенные участки зависимости действительной части проницаемости от подмагничивающего поля должны иметь одинаковую форму в двух случаях измерения. Первый описан выше, в другом же случае измерительное радиочастотное поле действует вдоль ОЛН, а подмагничивающее — вдоль ОТН. Для идеальной пленки подобные участки этих кривых сдвинуты по горизонтальной оси на  $2H_k$ .

Используя ферромагнитный резонанс,  $H_k$  можно найти разными способами. Например, измеряют частоту резонанса  $\omega_p$  в функции постоянного поля  $H_0$ , действующего по ОЛН [80]. Затем строят зависимость  $\omega_p^2$  от  $H_0$ . Теоретически должна получиться прямая линия, что подтверждается и экспериментально. Точка пересечения этой прямой с горизонтальной осью дает значение  $H_k$ .

Измерения  $H_k$  по проницаемости и резонансному полю имеют много общего ввиду физической связи между этими величинами. Эта связь в более сложной форме наблюдается и при наличии магнитных неоднородностей [108], вызывающих, в частности, сдвиг резонансной частоты, эквивалентный некоторому внутреннему полю смещения пленки [81].

Другие методы определения  $H_k$ , например описанные в работах [109, 110], вряд ли найдут широкое применение.

**Определение амплитудной и угловой дисперсий анизотропии.** Магнитные неоднородности существенно влияют на физические и эксплуатационные свойства пленок. Они являются следствием микро- и макронеоднородностей состава и внутренних напряжений в пленках, неизбежных при любой технологии, а также их поликристалличности. Определение степени магнитной неоднородности очень важно при исследовании пленок. Последняя характеризуется амплитудной (по величине энергии анизотропии) и угловой (по отклонению локальной ОЛН от средней оси образца) дисперсиями анизотропии. За меру угловой дисперсии принимают углы  $\alpha_y$ ,  $\alpha_\sigma$ ,  $\alpha_{90}$  и  $\alpha_{90}$ , внутри которых по обе стороны от результирующей ОЛН находятся направления осей соответственно 50, 68, 83 и 90% площади образца. Величина  $\alpha_\sigma$  соответствует стандартному отклонению при гауссовом распределении.

За меру амплитудной дисперсии принимают  $\delta H_k$  — половину разницы двух значений напряженности поля, между которыми лежат величины  $H_k$  90%-ной площади образца, или относительную величину  $\Delta_{90} = \frac{\delta H_k}{H_k}$  (где  $H_k$  — эффективная напряженность поля анизотропии образца).

В работах [37, 40] описана одна из наиболее распространенных методик измерения дисперсии. Угловую дисперсию по ней измеряют двумя способами. При первом на пленку накладывают сначала переменное поле, большее  $H_k$ , действующее вдоль ОЛН. Продольная (вдоль ОЛН) составляющая потока пленки при перемагничивании отсутствует. Затем пленку поворачивают и определяют продольную составляющую потока в функции угла  $\alpha$  между переменным полем и ОЛН. Ее отношение к потоку пленки при насыщении считают равным относительной площади участков пленки, ОЛН которых лежат внутри угла  $\pm \alpha$ .

При втором способе поворачивать образец не требуется. Кроме переменного поля вдоль ОЛН накладывают поле напряженностью  $H$  вдоль ОЛН. Угол дисперсии принимают равным  $\frac{H}{H_k}$ , где  $H$  — напряженность поля вдоль ОЛН, вызывающего вращение соответствующей части намагниченности пленки в данном направлении. В работе [75] предложено некоторое усовершенствование экспериментальной части данного способа, а в работах [111—113] описана несколько отличная методика.

Иногда магнитное состояние образца после наложения соответствующих полей определяют не осциллографированием э. д. с., а другими методами. Преимущество магнитооптического [53, 114] и электронно-микроскопического [115] методов состоит в том, что легко можно наблюдать малые образцы и их отдельные участки.

И угловую, и амплитудную дисперсии можно определить статическими измерениями на анизометре [101, 116], а также определением площади частного цикла в слабом поле [68] или, что гораздо проще, измерением мнимой части проницаемости [117]. Подмагничивающее поле  $H_0$  действует вдоль ОЛН, а слабое переменное поле, для которого определяют площадь частного цикла, — вдоль ОЛН. При напряженности поля  $H_0$ , несколько меньшей  $H_k$ , заметно расширяется петля, а при напряженности, большей  $H_k$ , ее площадь и магнитные потери снова стремятся к нулю. Разница значений  $H_0$ , при которых происходит расширение и сужение петли, приблизительно равна  $2\Delta_{90}$ . Для измерения угловой дисперсии нужно зафиксировать  $H_0 = H_k$  и измерить площадь петли в функции угла поворота пленки относительно этого поля. Если считать, что угловая диспер-

сия описывается гауссовым распределением, то за  $2\alpha_{90}$  можно принять угол, внутри которого потери превышают  $\frac{1}{4}$  часть своего максимального значения. При малой угловой дисперсии пленку можно не поворачивать, а поворот намагниченности осуществить слабым подмагничивающим полем напряженностью  $H$  вдоль ОЛН. Тогда соответствующий угол  $\alpha = \frac{H}{H_0}$ .

Амплитудную дисперсию находят и измерением ширины линии ферромагнитного резонанса в области частот  $10^8$  гц [81, 118]. Зависимость ее от частоты описывается соотношением

$$\Delta H = (\Delta H)_0 + 7,13 \cdot 10^{-7} \cdot f_p \alpha_0, \quad (3)$$

где  $(\Delta H)_0$  — не зависящее от частоты слагаемое, пропорциональное амплитудной дисперсии и равное  $2,8 \delta H_k$  [81];

$\alpha_0$  — коэффициент затухания в уравнении Гильберта.

Строго говоря, потери, наблюдаемые при определении угловой и амплитудной дисперсий методом магнитной проницаемости, нужно экстраполировать к нулевой частоте. Но практика показывает [118], что при частоте  $0,5-2$  Мгц имеется только остаточная часть потерь.

Потери, наблюдаемые в пленках на этих частотах, иногда необоснованно квалифицируют как резонансные. Формально при указанных выше условиях действительно соблюдается условие резонанса, но из-за магнито-статического взаимодействия между участками вряд ли возможно существование ферромагнитного резонанса на столь низкой частоте. Фактически здесь, как и при аналогичных измерениях на низких частотах [68], наблюдаются потери на гистерезис.

В силу причин, отмеченных выше, результаты измерений угловой и амплитудной дисперсий, а также  $H_k$  реальных пленок в значительной мере условны — они зависят от метода измерения. Тем не менее для применяемых в практике пленок с  $\alpha_{90} = 1-3^\circ$  и  $\Delta_{90} = 0,1$  результаты определения этих величин различными методами оказываются чаще всего близкими или совпадающими. С увеличением дисперсии разница в ее определении возрастает.

**Измерение коэффициента затухания ( $\alpha_0$  или  $\lambda$ ).** Коэффициенты  $\alpha_0$  и  $\lambda$  характеризуют скорость затухания свободной прецессии электронных спинов. В идеальном случае однородного вращения они определяют магнитные потери в пленке при любой частоте (кроме самых высоких, где появляются потери, связанные с вихревыми токами), ширину резонансной кривой, а также скорость импульсного перемагничивания [4]. Измерение  $\alpha_0$  и  $\lambda$  интересно для пленок, работающих в импульсном режиме (статические запоминающие элементы) и в режиме почти гармонических колебаний (индуктивный параметрон).

В реальных пленках явления импульсного перемагничивания [119] и ферромагнитного резонанса намного сложнее, чем в идеальных. Наблюдаемые потери и время перемагничивания больше, чем определяемые величиной  $\alpha_0$ . Поэтому при описании динамических явлений в реальных пленках  $\alpha_0$  не может играть роль универсального параметра, как это имеет место в модели однородного вращения.

Значение  $\alpha_0$  получают и при резонансных измерениях [118], а также при наблюдении свободных колебаний намагниченности на частотах  $10^8-10^{10}$  гц [120]. В этих случаях  $\alpha_0 = 0,01-0,04$ . Существует пропорциональность между  $\alpha_0$  и  $\Delta_{90}$ .

Несколько лет назад  $\alpha_0$  вычисляли по формуле (2) без учета формулы (3). Это приводило к ложным выводам о частотной зависимости  $\alpha_0$  и ее аномально больших значениях в области низких частот [4].

**Исследование малых образцов и локальных свойств ТМП.** Очень важно исследование пленок диаметром 1 мкм и меньше. Такого размера достигают некоторые пятна в матрицах современных запоминающих устройств на пленках. В научных целях часто требуется исследовать отдельные участки относительно больших образцов.

Помимо дальнейшего уменьшения объема исследуемого вещества, задачу усложняют следующие обстоятельства. На участок пленки нельзя намотать витки измерительной катушки. Применение статических методов (кроме вибрационного) становится невозможным, а от феррографов требуется предельная чувствительность.

Проще испытывать пленку импульсными методами [37, 121], а также при подаче на нее гармонических сигналов. В работе [122] описан зонд, позволяющий определять локальное значение  $H_k$  и направление ОЛН участка пленки или пятна диаметром 0,3 мкм. Две обмотки, помещенные на зонде, создают синусоидальные сигналы с частотой 11 и 8 МГц. Сигнал суммарной частоты исчезает в измерительной витке, когда локальное направление намагниченности перпендикулярно к этому витку. Устройство имеет выход на самопишущий прибор.

Порошковый, магнитооптический и электронно-микроскопический методы применяют для исследования пленок самого малого размера. Разработан магнитооптический метод определения локальных значений  $H_k$  и направлений ОЛН на участках пленки площадью 0,25—1 мкм<sup>2</sup> [123]. Он основан на измерении пороговых полей необратимых вращений намагниченности при перемагничивании пленки в двух направлениях, близких к ОЛН. В работе [124] описана установка, позволяющая с помощью экваториального эффекта Керра снимать основную кривую намагничивания, а также определять коэрцитивную силу и остаточную намагниченность на участках пленки диаметром 1 мкм. Эта установка состоит из металл-микроскопа МИМ-7, фотоумножителя и специального селективного усилителя с коэффициентом усиления до  $2 \cdot 10^7$ .

Исследование с помощью продольного эффекта Керра участков пленки диаметром 20 мкм описано в работе [125]. Источником света здесь служил лазер. Выходной сигнал снимали с фотоумножителя с фазовым детектором. Направление намагниченности участков определяли с погрешностью до 0,1°.

Направление оси анизотропии и значение  $H_k$  участка пленки можно найти, расположив его против отверстия в полом резонаторе, работающем на частоте 5—10 ГГц [126, 127]. Таким методом исследуют участки диаметром 0,2 мкм и более. С применением сверхпроводящих резонаторов согласно расчетам станет возможным исследование участков пленки с меньшим диаметром — до  $2 \cdot 10^{-8}$  м (200 Å).

Измеренные локальные свойства могут отличаться от свойств данного участка пленки из-за взаимодействия его с окружающими участками или пятнами и влияния окружающих проводников. Это относится как к отдельным участкам сплошных пленок, так и к элементам матрицы [121, 128].

**Эксплуатационные параметры тонких магнитных пленок.** Кроме общезначимых свойств пленок большое значение имеют параметры, непосредственно определяющие их работу в технических устройствах.

Характеристики, определяющие работу пленок в различных устройствах, весьма разнообразны. Отметим следующие из них:

1. Угол скоса — разница между требуемым и фактическим направлениями оси легкого намагничивания данного элемента в матрице.

2. Напряженность поля записи — напряженность такого продольного поля, которое нужно приложить к пленкам в матрице, чтобы 90% их ока-



записи намагниченными в заданном направлении вдоль ОЛН после снятия поперечного поля, большего  $H_k$ .

3. Коэрцитивная сила разрушения — минимальная напряженность поля, которое, будучи приложено вдоль ОЛН навстречу остаточной намагниченности, вызывает заметное необратимое изменение намагниченности. Это условная характеристика, зависящая от разрешающей способности измерительной аппаратуры.

4. Критический угол — минимальный угол между направлением поля, действующего на пленку, и ее ОТН, при котором после снятия поля намагниченность 90% объема пленки поворачивается к одному из направлений ОЛН.

5. Время релаксации — время, в течение которого после снятия сильного поперечного поля намагниченность пленки поворачивается от направления ОТН в направлении ОЛН. Опыт производят при наличии слабого продольного поля, делающего вращение однородным.

К пленкам предъявляют ряд специфических требований при построении регистров сдвига, использующих смещение доменных границ. Здесь поле, необходимое для образования доменов с обратной полярностью в однородно намагниченной пленке, должно быть возможно больше поля трогания существующих границ.

Указанные характеристики могут быть измерены общими методами, рассмотренными выше. Более подробные сведения содержатся в работах [35, 111, 121, 129, 130].

#### Применение тонких магнитных пленок в измерительной технике

Тонкие магнитные пленки служат чувствительным индикатором магнитных полей — постоянных, синусоидальных и импульсных. Их применяют и для измерения этих полей.

При периодическом перемагничивании пленки в направлении ОТН перемагничивание осуществляется путем смещения границ и неоднородного вращения. В измерительной катушке с осью, параллельной ОЛН, при этом не наводится никакого сигнала, связанного с пленкой. Если же в направлении ОЛН наложить слабое постоянное поле, то перемагничивание будет происходить путем более или менее однородного вращения. В измерительной катушке появляется сигнал; его фаза определяется направлением постоянного поля, а величина до определенного предела ему пропорциональна.

В работе [131] предложен нуль-индикатор магнитного поля, основанный на этом принципе. Более чувствительный прибор, обнаруживающий как постоянное, так и переменное поле порядка  $10^{-4}$  а/м описан в работе [132].

Возможно применение магнитных пленок для градуировки импульсных полей [85]. Используют зависимость порогового поля перемагничивания вдоль ОЛН от постоянного поля, направленного вдоль ОТН. Более точным будет определение импульсного магнитного поля, если измерять э. д. с., наведенную в сигнальной обмотке, в функции постоянного поля, направленного навстречу импульсному [133]. При действии обоих полей вдоль ОЛН сигнал пропорционален их разнице. Если известна величина постоянного поля, то амплитуду импульсного поля можно найти без дополнительной градуировки.

#### Заключение

Аппаратура для исследования пленок должна включать в себя:

1) магнитометр для статических измерений с постоянной по вращающему моменту не более  $10^{-8}$ — $10^{-9}$  н·м/дел;

2) осциллографический феррограф для пленок с постоянной по потоку не менее  $10^{-12}$  об/мм; полоса пропускания измерительной системы должна быть не менее чем в 30 раз выше частоты перемагничивающего поля;

3) установку для измерения толщины пленок в интервале  $10^{-8}$ — $10^{-6}$  м ( $100$ — $10\,000$  Å) с погрешностью не выше  $\pm 10\%$  (желательно без разрушения образца);

4) магнитооптическую аппаратуру для наблюдения доменной структуры, а также осциллографирования низкочастотных петель магнитооптическим методом;

5) устройство для низкочастотных импульсных измерений (характернограф) с порогом чувствительности по потоку не ниже  $10^{-12}$  об, позволяющее определять амплитудную и угловую дисперсии анизотропии и другие параметры;

6) установку для наблюдения импульсного перемагничивания пленок при длительности фронта импульса порядка десятых долей наносекунды, амплитуде импульса тока до 20 а, с полосой пропускания измерительного канала не ниже  $10^{10}$  гц;

7) устройства для измерения комплексной магнитной проницаемости на частотах 0,5—5 Мгц;

8) устройства для наблюдения ферромагнитного резонанса на частотах  $10^8$ — $10^{10}$  гц.

Все приборы должны обеспечивать измерения на образцах сравнительно большого ( $1\text{ см}^2$ ) и малого ( $1\text{ мм}^2$  и менее) размеров и на отдельных пятнах матрицы, а также объективный отсчет и автоматическую запись показаний.

В связи с тем что пленки представляют собой образцы с разомкнутой магнитной цепью, они особенно подвержены влиянию случайных магнитных полей. Поэтому необходимо устройство для автоматической компенсации посторонних полей в объеме порядка  $2\text{ см}^3$  в направлении двух координатных осей с точностью не ниже 0,1 а/м.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы Симпозиума по тонким ферромагнитным пленкам. «Изв. АН СССР», сер. физ., 1961, т. 25, № 5.
2. Материалы II Всесоюзного симпозиума по физике тонких ферромагнитных пленок. «Изв. АН СССР», сер. физ., 1965, т. 29, № 4; 1966, т. 30, № 1.
3. Тонкие ферромагнитные пленки. Перевод с нем. под ред. Телеснина Р. В. М., «Мир», 1964.
4. Магнитные свойства металлов и сплавов. М., ИЛ., 1961.
5. Магнитные элементы устройства вычислительной техники. М., ИТМ и ВТ АН СССР, 1961.
6. Краймер А. П. Быстродействующие ферромагнитные запоминающие устройства. М.—Л., «Энергия», 1964.
7. Тонкие магнитные пленки. Сб. переводов. Киев, 1963.
8. Шюппель В. и др. «Физика металлов и металловедение», 1959, т. 8, стр. 837.
9. Neugebauer С. «Phys. rev.», 1959, v. 116, p. 1441.
10. Мильнер А. С. и Татарникова Л. И. «Физика металлов и металловедение», 1960, т. 9, стр. 673; «Приборы и техника эксперимента», 1963, № 1, стр. 131.
11. Neugebauer С. «Zs. angew. Phys.», 1962, Bd. 14, S. 182.
12. Boyd M. IBM. J., 1960, v. 4, p. 116.
13. Humphrey F. «Rev. sci. instrum.», 1963, v. 34, p. 348.
14. Телеснин Р. В. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1965, № 3, стр. 236.
15. Torgok E. and oth. «Rev. sci. instrum.», 1964, v. 35, p. 1039.
16. King A. and oth. «J. sci. instrum.», 1964, v. 41, p. 766.
17. Siegle W., Beam W. «Rev. sci. instrum.», 1964, v. 35, p. 1174.
18. Griffiths J. «Physica», 1951, v. 17, p. 253.
19. Поливанов К. В., Фрумкин А. Л. «Физика металлов и металловедение» 1963, т. 15, стр. 848.

20. Eckardt J., Zehler V. «Zs. angew. Phys.», 1963, Bd. 15, S. 357.
21. Reincke W. «Zs. Phys.», 1963, Bd. 174, S. 35.
22. Flander P., Doyle W. «Rev. sci. instrum.», 1962, v. 33, p. 691.
23. Oquey H. «Rev. sci. instrum.», 1960, v. 31, p. 701.
24. Bruzinski T., Sahda D. IRE Intern. Conv. Rec., 1961, v. 9, pt. 9, p. 249.
25. Petit S. Comptes rendus, 1962, v. 255, p. 1885.
26. Hoffmann H. «Zs., Phys.», 1961, Bd. 163, S. 261.
27. Поливанов К. М., Фрумкин А. Л. Некоторые вопросы методики исследования магнитных свойств тонких магнитных пленок в статическом и квазистатическом режимах. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
28. Batt E. «Naturwiss», 1962, Bd. 49, S. 512.
29. Hellenthal W. «Zs. Naturf.», 1959, Bd. 14a, S. 1077.
30. Methfessel S. Proc. Internat. Conference on Information processing. UNESCO, 1959, p. 439.
31. Schrader G. «Rev. sci. instrum.», 1961, v. 32, p. 429.
32. Kaufman B. A. «Rev. sci. instrum.», 1964, v. 35, p. 1163.
33. Gold H., Gray H. «Rev. sci. instrum.», 1965, v. 36, p. 854.
34. Телесний Р. В., Яковлев В. Я. «Приборы и техника эксперимента», 1965, № 3, стр. 240.
35. Winsor G. «J. Electronics and Control», 1961, v. 13, p. 437.
36. Кобелев В. В. Действие чередующихся взаимно-перпендикулярных полей на ферромагнитные пленки. М., ИТМ и ВТ АН СССР, 1963.
37. Crowther T. «J. appl. phys.», 1963, v. 32, p. 580.
38. Methfessel S. and oth. «J. appl. phys.», 1961, v. 32, p. 1959.
39. Буравихин В. А. Автореферат диссертации. Красноярск, 1961.
40. Smith D., Harte K. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1399.
41. Киренский Л. В. и др. «Физика металлов и металловедение», 1961, т. 11, стр. 529.
42. Dove D. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 2067.
43. Fowler C., Fryer E. «Phys. rev.», 1956, v. 104, p. 552.
44. Reimer L. «Zs. Naturf.», 1956, Bd. 11A, S. 611.
45. Boersch H., Lambek M. «Zs. Phys.», 1961, Bd. 165, S. 176.
46. Coren R. L., Francombe M. H. «J. de phys.», 1964, v. 25, p. 233.
47. Кобелев В. В., Корсунский А. А. Доменная структура одноосных ферромагнитных пленок. М., ИТМ и ВТ АН СССР, 1961.
48. Treves D. «J. appl. phys.», 1961, v. 32, p. 358.
49. Kranz J., Hubert A. «Zs. angew. Phys.», 1963, Bd. 15, S. 220.
50. Robinson C. «J. Opt. Soc. Amerika», 1963, v. 53, p. 681.
51. Green A., Prutton M. «J. sci. instrum.», 1963, v. 40, p. 490.
52. Green A., Prutton M. «J. sci. instrum.», 1962, v. 39, p. 244.
53. Веам W., Апп К. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1561.
54. Пак Н. Г., Кан С. В. «Приборы и техника эксперимента», 1963, № 1, стр. 133.
55. Craik D., Wood M. «J. sci. instrum.», 1965, v. 42, p. 410.
56. Пак Н. Г. и др. «Изв. АН СССР», сер. физ., 1964, т. 28, стр. 157.
57. Archibald P. and oth. «Rev. sci. instrum.», 1960, v. 31, p. 653.
58. Swindell W., Lee E. «Physics Letters», 1963, v. 7, p. 104.
59. Songer R., Moore G. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1213.
60. Suits J., Pugh E. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1057.
61. Boersch H. und and. «Zs. Phys.», 1960, Bd. 159, S. 388.
62. Fuller H., Hale M. «J. appl. phys.», 1960, v. 31, p. 238.
63. Liesk W. «Zs. angew. Phys.», 1962, Bd. 14, S. 200.
64. Wade R. Proc. Phys. soc. Lond. 1962, v. 79, p. 1237.
65. Пынько В. Г. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 1, стр. 178.
66. Warrington D. «Phil. mag.», 1964, v. 9, p. 261.
67. Sato H. and oth., «J. appl. phys.», 1964, v. 35, p. 822.
68. Тогок Е. and oth. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 3037.
69. Фрумкин А. Л. Автореферат диссертации. МЭИ, 1962.
70. Фрумкин А. Л. «Изв. АН СССР», сер. физ., 1962, т. 26, стр. 303.
71. Smith D. «J. appl. phys.», 1958, v. 29, p. 264.
72. Dietrich W. and oth. IBM j., 1960, v. 4, p. 189.
73. Телесний Р. В. и др. «Радиотехника и электроника», 1962, т. 7, стр. 1235.
74. Никитина Т. Н. «Вестник МГУ», сер. физ., астр. 1962, № 6, стр. 59.
75. Телесний Р. В. и др. «Изв. АН СССР», сер. физ., 1964, т. 28, стр. 572.
76. Nomura M. «J. Sci. Hiroshima Univ.», Ser. A, Div. 2, 1964, v. 27, № 2—3, p. 83.
77. Ферромагнитный резонанс. Сб. статей. М., Физматгиз, 1961.
78. Ферромагнитный резонанс. Сб. статей. М., Физматгиз, 1953.
79. Поливанов К. М., Фрумкин А. Л. «Физика металлов и металловедение», 1962, т. 14, стр. 165.
80. Ngo D. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 3626.

81. Nelson R. «J. appl. phys.», 1964, v. 35, p. 808.
82. Conger R., Essig F. «Phys. rev.», 1956, v. 104, p. 915.
83. Chen D., Morrish A. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1146.
84. Soohoo R. «J. appl. phys.», 1960, v. 31, N 5, Suppl., p. 218.
85. Smith D., Weiss G. «J. appl. phys.», 1958, v. 29, p. 290.
86. Hasty T., Boudreaux W. «J. appl. phys.», 1961, v. 32, p. 1807.
87. Hasty T. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1079.
88. Шкляревский И. Н. «Оптика и спектроскопия», 1958, т. 5, стр. 617.
89. Дурасова Ю. А., Рыбак Е. Н. «Приборы и техника эксперимента», 1963, № 1, стр. 195.
90. Gouredux G., Colombani A. Comptes Rendus, 1958, v. 246, p. 741.
91. Hirschorn J. «J. phys. and chem. solids.», 1962, v. 23, p. 1821.
92. Рабкин Л. И. Высокочастотные ферромагнетики. М., Физматгиз, 1960.
93. West F. «J. appl. phys.», 1961, v. 32, № 3, Suppl., p. 290.
94. Hirsch A., Friedman N. Physika, 1963, Bd. 29, S. 543.
95. Egan W., Juretschke H. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1477.
96. Weiss G., Smith D. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1166.
97. Чернышев Е. Т., Чернышева Н. Г., Чечурина Е. Н. Магнитные измерения на постоянном и переменном токе. М., Стандартгиз, 1962.
98. Телеснин Р. В., Колотов О. С. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 17, стр. 834.
99. Fowler C. and oth. «Phys. Rev.», 1956, v. 104, p. 645.
100. Chang J. and oth. «J. appl. phys.», 1964, v. 35, p. 830.
101. Doyle W. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1769.
102. Feldtkeller E. «Physics Letters», 1963, v. 7, № 9.
103. Torok E. «J. appl. phys.», 1965, v. 36, p. 952.
104. Middelhoek S. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1111.
105. Кобелев В. В. «Физика металлов и металловедение», 1962, т. 13, стр. 467.
106. Beerforth T. «J. of Electronics and Controls», 1962, v. 13, p. 434.
107. Torok E., White R. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1064.
108. Kambersky V. «Phys. Stat. Sol.», 1964, v. 7, № 1, K 17.
109. Rossing T., Stolen R. «Rev. sci. instrum.», 1961, v. 32, p. 752.
110. Feldtkeller E. «Zs. Phys.», 1963, Bd. 176, S. 510.
111. Raffel J. and oth. «Proc. IRE», 1961, v. 49, p. 155.
112. Peacock R., Winsor G. «Natures», 1961, v. 191, p. 996.
113. Daughton R., Rohm A. «IEEE Trans. Comm. and Electron.», 1964, v. 83, p. 247.
114. Телеснин Р. В. и др. «Физика металлов и металловедение», 1964, т. 18, стр. 691.
115. Coren R. «J. appl. phys.», 1964, v. 35, p. 201.
116. Hasegawa R. and oth. «J. appl. phys. of Japan», 1964, v. 3, № 11.
117. Uchiama S. and oth. «J. appl. phys. of Japan», 1963, v. 2, p. 621.
118. Vescial P. and oth. «J. appl. phys.», 1965, v. 36, p. 1054.
119. Родичев А. М. «Физика металлов и металловедение», 1965, т. 19, стр. 652.
120. Hearn B. «J. Electronics and Controls», 1964, v. 16, p. 33.
121. Bonuhard P. «Natures», 1964, v. 204, p. 1185.
122. Bades J., Ellis D. «Rev. sci. instrum.», 1963, v. 34, p. 1188.
123. Ильичева Е. Н. «Физика металлов и металловедение», 1965, т. 19, стр. 354.
124. Крипчик Г. С. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 4, стр. 171.
125. Dove D., Long T. «J. appl. phys.», 1965, v. 36, p. 1068.
126. Soohoo R. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, p. 1276.
127. Телеснин Р. В., Козлов В. И. «Изв. АН СССР», сер. физ., 1965, т. 29, стр. 568.
128. Bonuhard P. «J. appl. phys.», 1964, v. 35, p. 764.
129. Bavet W. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1207.
130. Tickle A. «J. appl. phys.», 1964, v. 35, p. 768.
131. Кобелев В. В. и Корсунский А. А. «Приборы и техника эксперимента», 1962, № 5, стр. 154.
132. West F. and oth. «J. appl. phys.», 1963, v. 34, p. 1163.
133. Tatsumoto E. «J. appl. phys. of Japan», 1963, v. 2, p. 254.

### АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ СМЕЩЕНИЯ И НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ АНИЗОТРОПИИ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК РАДИОЧАСТОТНЫМ МЕТОДОМ

Коэрцитивную силу смещения  $H_c$  и напряженность поля анизотропии  $H_k$  тонких магнитных пленок измеряют радиочастотным методом по кривым магнитной проницаемости, наблюдаемым на экране осциллографа. Для определения  $H_c$  используют кривую поперечной проницаемости  $\mu_{\perp} = F(H_d)$ , кривая же продольной проницаемости  $\mu_{\parallel} = F(H_T)$  позволяет судить о величине  $H_k$ .

Если внешнее низкочастотное поле напряженностью  $H_d$  действует вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) пленки, а высокочастотное напря-

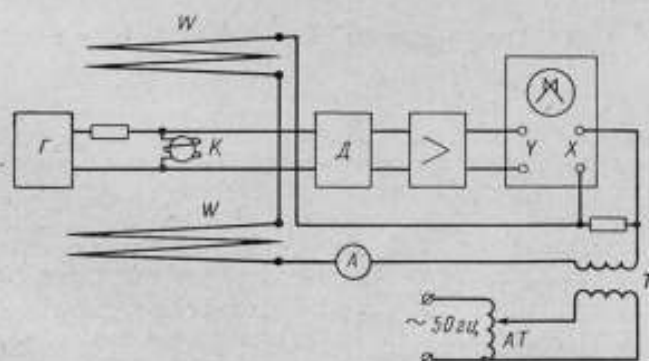


Рис. 1. Блок-схема установки.

женностью  $H_T$  — вдоль оси трудного намагничивания (ОТН), то по положению максимумов кривой  $\mu_{\parallel}$  определяют  $H_k$ , при котором происходит перемагничивание пленки вдоль ОЛН. Это перемагничивание обусловлено процессами смещения. В данном случае  $H_d$  можно принять за величину  $H_c$ .

Если же внешнее низкочастотное поле напряженностью  $H_T$  действует вдоль ОТН, а высокочастотное напряженностью  $H_d$  — вдоль ОЛН, то по величине  $H_T$ , при которой кривая  $\mu_{\parallel}$  достигает своего максимума, вычисляют  $H_k$ . Кривые  $\mu_{\perp}$  и  $\mu_{\parallel}$  определяют на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1.

Образец-пленку помещают в измерительную катушку в виде плоского соленоида  $K$ . Соленоид вместе с образцом располагают в центре системы

внешних катушек  $W-W$ , которые создают внешнее однородное магнитное поле. Для компенсации внешних магнитных полей (составляющие поля Земли и статические поля измерительных приборов и других установок) используют дополнительные две пары катушек. В цепи измерительной обмотки протекает высокочастотный ток, создающий напряженность поля  $H'$ . Чтобы обеспечить независимость  $H'$  от входного полного сопротивления этой обмотки, задающий высокочастотный генератор  $G$  должен работать в режиме источника тока. Напряжение с измерительной катушки поступает на пиковый детектор  $D$ , постоянную времени которого выбирают с учетом прохождения сигналов от быстрых процессов перемагничивания образца. Сигнал, поступающий с детектора, усиленный низкочастотным усилителем, подается на вход  $Y$  осциллографа. Ввиду высокой чувствительности измерительного канала для получения четкого изображения на экране осциллографа аппаратура тщательно экранировалась.

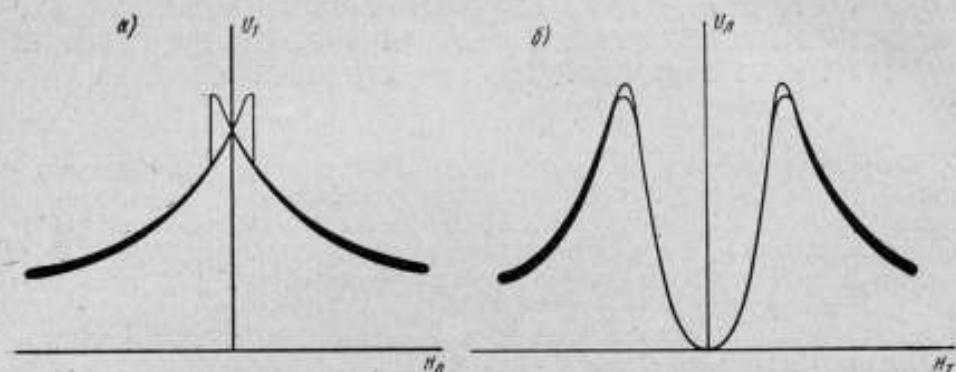


Рис. 2. Осциллограммы кривых:  $U_\tau = F(H_\alpha)$  (а);  $U_\alpha = F(H_\tau)$  (б).

На горизонтальный вход осциллографа подается напряжение, пропорциональное напряженности внешнего поля. Последнюю можно отсчитывать либо по градуированной шкале на экране осциллографа, либо по показаниям прибора, включенного последовательно в цепь намагничивающих катушек и градуированного в единицах напряженности поля.

При измерении  $H_c$  выходное напряжение на измерительной обмотке равно  $U_\tau = k\omega H'_\alpha \mu_\alpha$  и позволяет судить о характере кривой  $\mu_\tau = F(H_\alpha)$  ( $k$  — коэффициент, учитывающий геометрию измерительной обмотки и образца). При определении  $H_k$  выходное напряжение равно  $U_\alpha = k\omega H'_\tau \mu_\alpha$  и характеризует ход кривой продольной проницаемости  $\mu_\alpha = F(H_\tau)$ . Осциллограммы кривых  $U_\tau = F(H_\alpha)$  и  $U_\alpha = F(H_\tau)$  приведены на рис. 2, а и б.

Для получения кривых  $\mu_\tau$  и  $\mu_\alpha$  квазистатического характера частота внешнего поля была выбрана 50 гц, а частота поля напряженностью  $H'$  составляла 5—10 Мгц, благодаря чему не наблюдались динамические эффекты в магнитных пленках. Собственная частота измерительной обмотки с образцом составляла свыше 100 Мгц (для образцов самых больших размеров и обмоток с наибольшим числом витков). Напряженность поля  $H'$  не превосходила 1 а/м. Это позволяло наблюдать кривые дифференциальной проницаемости, а также избежать влияния данного поля на результаты измерений  $H_c$  и  $H_\tau$ . В связи с тем что характеристики тонких магнитных пленок зависят от положения ОЛН по отношению к внешним полям,

перед началом измерения образец был установлен в соответствующее положение.

На описанной выше установке измеряли плоские образцы магнитных пленок, изготовленных методом вакуумного напыления на стеклянные подложки. Состав пленок близок к пермаллою (80% Ni — 20% Fe), толщина их  $1 \cdot 10^{-7} \div 7 \cdot 10^{-7}$  м (1000 ÷ 7000 Å). Определяли  $H_c$  и  $H_k$  отдельных образцов, а также производили локальное измерение параметров пленок на подложках большого размера; измерительная обмотка была выполнена в виде торцового щупа. Как показал двухлетний опыт работы, установка надежна и удобна в эксплуатации.

---

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТОУПРУГОЙ КОНСТАНТЫ ТОНКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ АНИЗОТРОПИИ

Тонкие магнитные пленки (ТМП), как и массивные материалы, обладают магнитоупругостью.

Если к намагниченной пленке приложить внешние силы, вызывающие напряжение в материале, то благодаря взаимодействию между намагниченностью и механическими напряжениями возникает магнитоупругая энергия. При этом изменяются положение вектора намагниченности и напряженность поля анизотропии  $H_k$ , которая является основным магнитным параметром пленки. В зависимости от знака магнитоупругости возникающие в материале напряжения увеличивают или уменьшают энергию анизотропии пленки.

В работе Митчелла и Ликкена\* показано, что магнитоупругая константа равна

$$\eta = \frac{\Delta H_k}{\frac{\Delta l}{l}},$$

где  $\Delta H_k$  — изменение напряженности поля анизотропии;  
 $\frac{\Delta l}{l}$  — относительное линейное изменение ТМП.

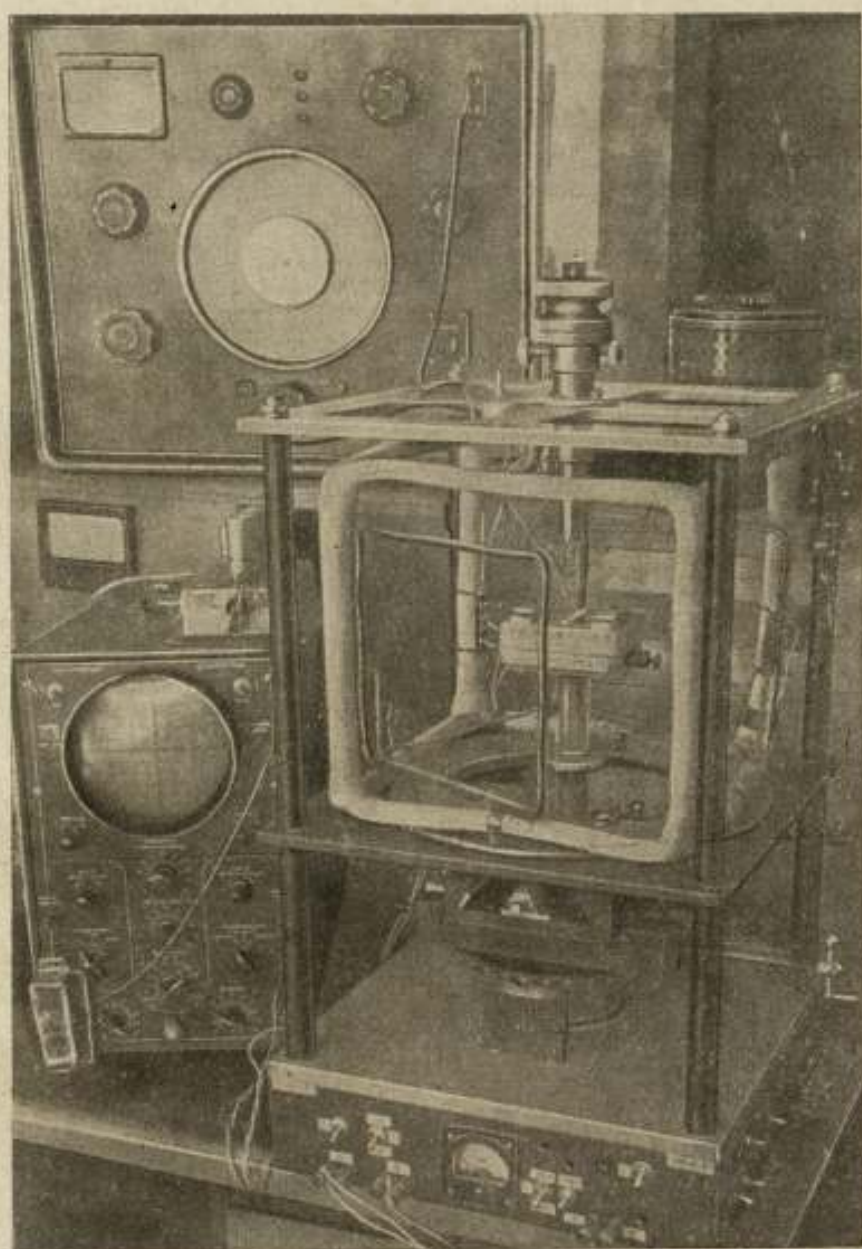
В настоящей работе предлагается простой и удобный радиочастотный метод определения  $\Delta H_k$  при приложении внешних сил с использованием торцового датчика. Сущность этого метода изложена в статье А. И. Бурмистрова и Н. А. Крупина\*\*.

Общий вид установки показан на рисунке. С помощью датчика исследуют сплошные или в виде пятен образцы ТМП площадью до  $5 \text{ мм}^2$ . Подложки под образцы могут быть как стеклянными, так и металлическими, любой формы. Торцовый датчик представляет собой катушку с тридцатью витками, намотанными на основание из плексигласа сечением  $2 \times 2 \text{ мм}^2$ . Ось катушки направлена параллельно поверхности пленки, вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН). Катушку с небольшим зазором подносят к ТМП. Таким образом, высокочастотное поле, создаваемое датчиком,

\* Mitchell E. N. and Lykken G. J. Magnetoelastic Behavior of Thin Ferromagnetic Films as a Function of Composition. «J. appl. phys.», 1962, v. 33, № 3.

\*\* См. стр. 153—155.





Общий вид установки.

действует вдоль ОЛН пленки, которая перемагничивается вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) низкочастотным магнитным полем (в данном случае 50 гц). Модулированный в соответствии с перемагничиванием пленки высокочастотный сигнал подается на усилитель, детектор и вертикальный вход осциллографа, на горизонтальные пластины которого поступает сигнал от низкочастотного перемагничивающего поля.

Напряжения в пленке возникают вследствие изгиба подложки с нанесенной на нее пленкой. Для стеклянных подложек сконструировано специальное изгибающее устройство, позволяющее измерять стрелу прогиба, по которой вычисляют относительное удлинение подложки  $\frac{\Delta l}{l}$ . Для того чтобы изменилась напряженность поля анизотропии  $H_k$ , необходимо подложку изгибать (растягивать ТМП) вдоль ОТН. Тогда, если пленка обладает отрицательной магнитострикцией,  $H_k$  будет увеличиваться, если положительной — уменьшаться. Погрешность определения  $\Delta H_k$  и  $\frac{\Delta l}{l}$  оценена в  $\pm 10\%$ .

---

### ОБ ИЗМЕРЕНИИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПЛЕНОК В ДИАПАЗОНАХ МЕТРОВЫХ И ДЕЦИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Для измерений магнитной проницаемости ферромагнитных пленок при низких радиочастотах используют многовитковые измерительные катушки [1, 2]. Применение катушек в области метровых волн приводит к появлению ошибок, величина которых возрастает с увеличением частоты. Длина измерительного контура составляет здесь уже заметную долю длины волны, вследствие чего повышается роль распределенных параметров контура; на результаты измерений в этом диапазоне большое влияние оказывает и частота собственного резонанса катушки. Имеются трудности при расчете потокоцепления пленки с катушкой. При измерениях обратной (начальной) проницаемости амплитуда высокочастотного магнитного поля, воздействующего на пленку, должна быть достаточно малой, что не всегда удается обеспечить в многовитковой катушке.

Для исследования магнитных свойств ферромагнитных пленок в метровом и дециметровом диапазонах волн с успехом могут быть использованы четвертьволновые полосковые резонаторы. Симметричный полосковый резонатор с воздушным заполнением представляет собой колебательную систему высокой добротности и позволяет исследовать образцы в однородном линейнополяризованном высокочастотном поле. Вследствие соответствующего подбора ширины внешних полосок, а также перехода открытого конца резонатора в прямоугольный волновод запредельного типа не происходит излучения энергии. Тонкую настройку в резонанс производят, изменяя длину внутреннего проводника перемещением наконечника, находящегося в пучности электрического поля и имеющего хороший электрический контакт с остальной частью внутренней полоски. Благодаря этому достигают постоянства собственной добротности резонатора при измерениях. В резонаторе имеется система отсчета, обеспечивающая высокую точность; волновое сопротивление его регулируют изменением расстояния между полосками [3].

В области метровых волн полосковые резонаторы применяют вместе с сосредоточенной емкостью. В данном диапазоне пленки можно исследовать куметром, но при этом необходимо учитывать влияние остаточных параметров его контура на результаты измерений.

Рассмотрим отрезок несимметричной полосковой линии с одинаковой шириной полосок, длиной  $l_0$  и волновым сопротивлением  $Z_1$ , подключенный к входным зажимам куметра. Эта линия соединена с конденсатором

переменной емкости  $C$  куметра посредством четырехполюсника (обозначенного пунктиром на рис. 1), который представлен в виде идеального трансформатора с коэффициентом трансформации  $k$  (по сопротивлению) и двух отрезков однородных линий  $l_1$  и  $l_2$  с волновыми сопротивлениями  $Z_1$  и  $Z_2$  соответственно.

Поместим исследуемую ферромагнитную пленку в форме диска вблизи закороченного конца полосковой линии, где высокочастотное магнитное

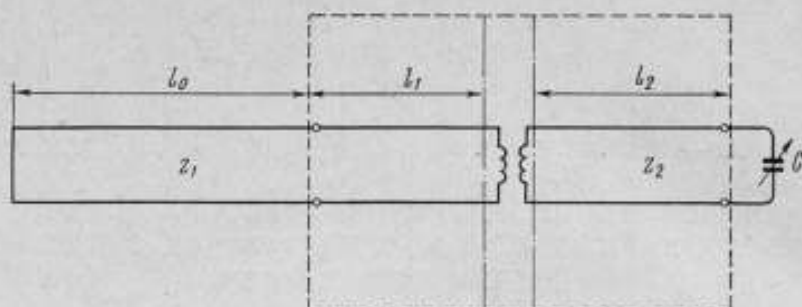


Рис. 1. Схема измерительного контура куметра с полосковой линией.

поле однородно и параллельно плоскости пленки. Пусть толщина пленки меньше глубины проникновения в нее магнитного поля. Из условия резонанса

$$\frac{kZ_1 \operatorname{tg} \beta (l_0 + l_1) + Z_2 \operatorname{tg} \beta l_2}{1 - \frac{kZ_1}{Z_2} \operatorname{tg} \beta (l_0 + l_1) \operatorname{tg} \beta l_2} = \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

находим соотношение между изменением индуктивности  $L_1^0 \delta l_0$  контура, вносимым пленкой, и изменением резонансной емкости  $\delta C$  конденсатора:

$$L_1^0 \delta l_0 = Z_1^2 B^2 \delta C; \quad (2)$$

$$B = \frac{U_0}{U_C} = \sqrt{k} \sin \beta (l_0 + l_1) \cos \beta l_2 + \frac{1}{\sqrt{k}} \cdot \frac{Z_2}{Z_1} \cos \beta (l_0 + l_1) \sin \beta l_2. \quad (3)$$

В уравнениях (1)–(3)  $\beta$  — фазовая постоянная;

$L_1^0$  — погонная индуктивность полосковой линии;

$U_0$  — амплитудное значение напряжения в полосковой линии, равное  $Z_1 I_0$  ( $I_0$  — амплитудное значение высокочастотного тока);

$U_C$  — напряжение электрического поля на конденсаторе.

С другой стороны,

$$L_1^0 \delta l_0 = \mu_0 \mu' \Delta V \left( \frac{H_0}{T_0} \right)^2, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума;

$\mu'$  — действительная составляющая проницаемости пленки в направлении высокочастотного поля (принимается  $\mu' \gg 1$ );

$\Delta V$  — объем, занимаемый пленкой;

$H_0$  — напряженность магнитного поля.

В равенстве (4) пренебрегаем малым изменением напряженности внешнего поля, обусловленным пленкой (толщина пленки много меньше остальных ее размеров, вектор намагниченности лежит в плоскости пленки).

Рассмотрим для сравнения вспомогательную полосковую линию одинаковых размеров с данной, но с однородным распределением высокочастотного тока и полей по сечению линии [3]. Напряженность магнитного поля находим, определяя плотность тока, протекающего вблизи пленки:

$$H_0 = \frac{I_0'}{b}, \quad (5)$$

где  $I_0'$  — амплитудное значение высокочастотного тока вспомогательной линии;

$b$  — ширина полосок.

Из формул (2) и (4) для  $\mu'$  получим

$$\mu' = \frac{1}{\Delta V} \cdot \frac{h^2}{\epsilon_0} B^2 \delta C. \quad (6)$$

Здесь  $h$  — расстояние между полосками;

$\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума.

Коэффициент  $B$  можно найти, используя в качестве известной индуктивности саму полосковую линию и определяя изменение резонансной емкости  $\delta C_1$  при перемещении короткозамыкателя на расстояние  $\delta l_1$ :

$$B^2 = C_1^0 \frac{\delta l_1}{\delta C_1}, \quad (7)$$

где  $C_1^0$  — погонная емкость линии.

При использовании выражения (7) формула (6) принимает вид

$$\mu' = \frac{1}{\Delta V} \cdot \frac{h^2 C_1^0 \delta l_1}{\epsilon_0 \delta C_1} \delta C. \quad (8)$$

Помещая в полосковую линию вместо исследуемой пленки медный образец небольшого объема  $\Delta V_1$ , можно получить для  $\mu'$  при условии, что глубина поверхностного слоя достаточно мала, следующее простое выражение:

$$\mu' = \frac{\Delta V_1}{\Delta V} \cdot \frac{\delta C}{\delta C_1}, \quad (9)$$

где  $\delta C_1$  — изменение резонансной емкости конденсатора, обусловленное медным образцом.

Определим мнимую составляющую магнитной проницаемости по формуле

$$\frac{\mu''}{\mu'} = \frac{\Delta R}{\omega \delta L}, \quad (10)$$

где  $\Delta R$  — изменение эквивалентного последовательного активного сопротивления контура, вносимое пленкой;

$\delta L = \frac{\delta C}{\omega^2 (C + C_s)^2}$  — изменение эквивалентной индуктивности контура ( $C_s$  — эквивалентная сосредоточенная емкость полосковой линии и четырехполосника).

Выражая в формуле (10) активное сопротивление контура через его добротность  $Q = \frac{2(C + C_s)}{\Delta C}$ , получим для  $\mu''$  следующее соотношение:

$$\mu'' = \mu' \frac{\Delta C_1 - \Delta C_0}{2\delta C}. \quad (11)$$

Здесь  $\Delta C_1$  и  $\Delta C_0$  — ширина резонансной кривой контура с образцом и без образца соответственно.

На рис. 2 приведена частотная зависимость составляющих  $\mu'$  и  $\mu''$  начальной поперечной магнитной проницаемости для пленки из пермаллоя (Ni ~ 83%, Fe ~ 17%), нанесенной на стеклянную подложку напылением в вакууме. Толщина пленки — приблизительно  $12 \cdot 10^{-8}$  м (1200 Å),

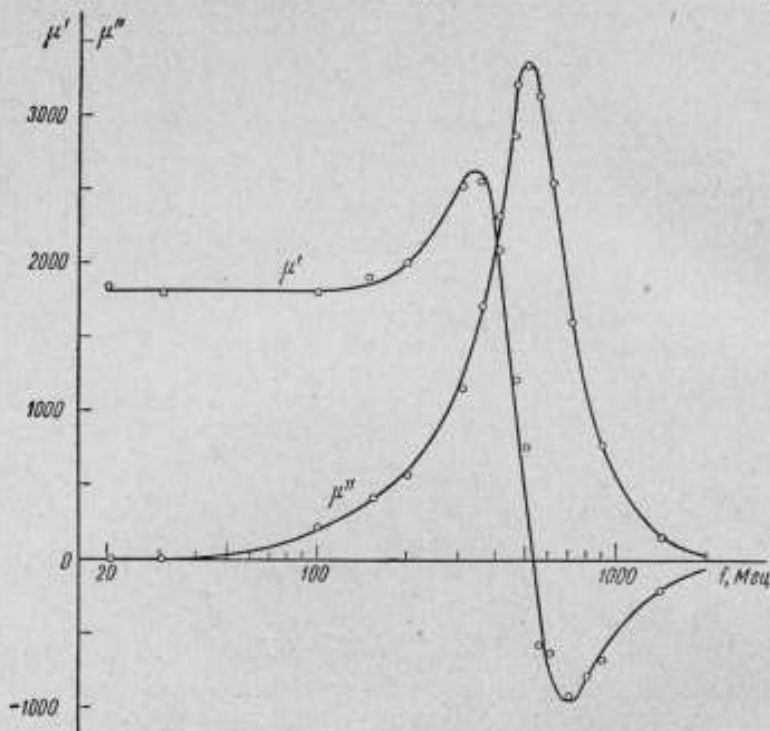


Рис. 2. Зависимость составляющих  $\mu'$  и  $\mu''$  начальной поперечной проницаемости пленки из пермаллоя от частоты  $f$ .

напряженность эффективного поля магнитной анизотропии 240 а/м. В диапазоне частот 20—300 Мгц был использован куметр с полосковой линией, в диапазоне 150—1500 Мгц — полосковый резонатор.

Результаты измерений показывают, что в пленке имеет место четко выраженный естественный ферромагнитный резонанс с частотой 500 Мгц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Полянов К. М., Фрумкин А. Л. Некоторые вопросы методики исследования магнитных свойств тонких магнитных пленок в статическом и квазистатическом режимах. «Труды институтов Комитета», вып. 64 (124). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
2. Feldtkeller E. «Zs. Phys.», 1963, Bd. 176, S. 510.
3. Дьюкс Дж. М. Печатные схемы. М., ИЛ, 1963.

**ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Измерение магнитных характеристик ферромагнитных материалов существующими методами в большинстве случаев весьма трудоемко. Это относится прежде всего к таким характеристикам, определение которых требует сложных экспериментов и последующих расчетов, например к составляющим потерь (на гистерезис, вихревые токи и дополнительные потери), функциональным зависимостям, в частности зависимости магнитной проницаемости от напряженности поля, и др.

Для научных исследований, производственного контроля магнитных свойств ферромагнитных материалов необходимо создать такую аппаратуру, в которой процесс измерения был бы полностью автоматизирован, а результаты (цифровые данные или графики) не требовали бы много времени для обработки.

Характеристики необходимо определять:

- а) статические — при намагничивании образцов в постоянном магнитном поле;
- б) динамические — при намагничивании образцов в переменном периодическом поле в широком диапазоне частот, импульсном по разной программе, а также при одновременном действии постоянного и переменного периодического полей.

В настоящей статье изложены некоторые соображения о возможных путях автоматизации отдельных измерительных процессов при определении магнитных характеристик ферромагнитных материалов. Измерительные устройства для записи кривых намагничивания здесь не рассмотрены.

**Определение статических характеристик**

Важнейшими статическими характеристиками ферромагнитных материалов являются основная кривая намагничивания и петля гистерезиса или отдельные точки этих кривых. При автоматизации процесса получения этих характеристик следует разграничивать процессы изменения напряженности намагничивающего поля и измерения магнитной индукции и напряженности поля, соответствующих разным точкам кривой намагничивания.

Применительно к основной кривой намагничивания регулирование намагничивающего тока можно осуществлять несколькими способами. При одном из них генератор должен создавать намагничивающий ток  $I$ , возрастающий периодически по линейному закону (рис. 1, а). Промежутки времени  $\Delta t_i$  определяются временем, необходимым для измерения приращений напряженности поля  $\Delta H_i$  и соответствующих им приращений индукции  $\Delta B_i$ . Недостатком данной программы является суммирование погрешностей определения напряженности поля и индукции для каждой последующей точки кривой. Кроме того, если на каком-либо участке кривой произошло непредвиденное уменьшение тока вместо увеличения, процесс измерения, включая и размагничивание образца, нужно повторить.

Подобных недостатков лишена программа изменения намагничивающего тока, показанная на рис. 1, б. Здесь каждый цикл  $t_n$ , соответствующий току  $I_n$ , должен продолжаться несколько периодов (порядка 10) с частотой  $f = 0,5-1$  гц, что необходимо для магнитной подготовки

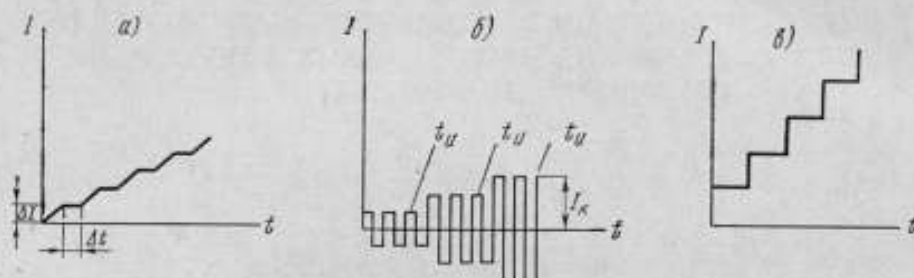


Рис. 1. Программы изменения намагничивающего тока.

образца. Измерение напряженности поля  $H_k$  и индукции  $B_k$  осуществляется в точках  $t_n$  по окончании магнитной подготовки для каждого значения  $H_k$ , соответствующего  $I_k$ .

Для автоматизации процесса измерения наиболее удобна программа, представленная на рис. 1, в. В этом случае крутизна нарастания э. д. с. в обмотке для измерения индукции (имеется в виду индукционный метод) невелика и потому сравнительно легко выполнить преобразование  $u \rightarrow f \rightarrow$  цифра. Преобразователь  $u \rightarrow f$  должен преобразовывать каждое текущее (мгновенное) значение напряжения  $u$  в частоту  $f$ , а счетчик, суммирующий все частоты за время изменения  $u$ , осуществлять интегрирование  $\int u dt$ . Поэтому число, записанное счетчиком, оказывается пропорциональным приращению полного потока сцепления с измерительной катушкой или, для данного сечения  $S$  образца и числа витков  $w$  измерительной катушки, приращению индукции  $B$ . Аналогично можно измерить и напряженность поля.

Подобный принцип описан Каптуллером [1]; упрощенная структурная схема измерительного устройства показана на рис. 2.

Намагничивающим током является анодный ток лампы  $L$ . Он изменяется по линейному закону в результате линейного изменения потенциала сетки, осуществляемого движком реостата  $R$ , связанным с двигателем  $D$ . Включение реостата  $R$  в цепь сетки, а не в цепь намагничивающего тока позволяет исключить погрешности, обусловленные непостоянством переходного контакта реостата. Эти погрешности вызваны тем, что счетчик при уменьшении тока вследствие увеличения сопротивления переходного контакта не учитывает уменьшения магнитного потока, а также тем, что при уменьшении тока нарушается магнитное состояние образца.



Процесс измерения заключается в следующем. При перемещении двигателя движка реостата изменяется потенциал сетки лампы  $L$ , а следовательно, и величина анодного (намагничивающего) тока. Э. д. с. с измерительной катушки  $W_1$ , в которую помещен образец, через преобразователь  $u \rightarrow f$  подается на счетчик  $C$ , соединенный с печатающим устройством ПУ. Как только на счетчик поступит определенное число импульсов  $N$ , специальное устройство  $Y$ , связанное со счетчиком, отключает двигатель, прекращая тем самым изменение потенциала сетки лампы. Таким образом, величина приращения тока  $\Delta I$ , а следовательно, и напряженности поля  $\Delta H$  обуславливается величиной  $N$ . Через определенное время, достаточное для записи полученного числа  $N$ , двигатель снова включается; происходит

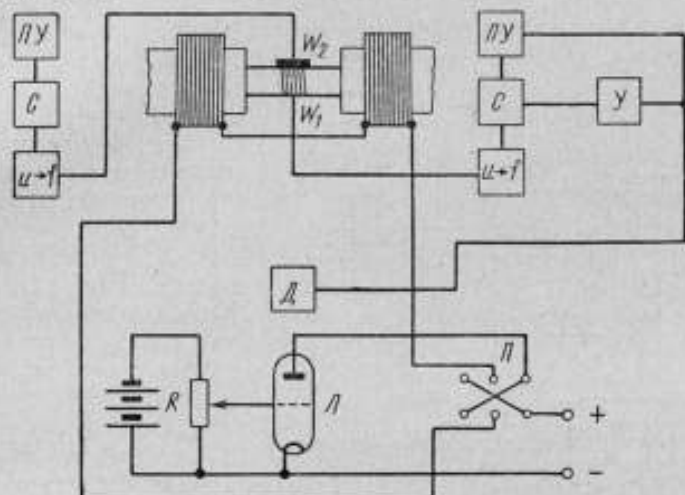


Рис. 2. Структурная схема автоматического устройства Каптуллера для определения статических кривых намагничивания.

увеличение намагничивающего тока по линейному закону, и на счетчик начинают поступать импульсы до тех пор, пока с приходом  $N$ -импульса двигатель снова отключится, после чего все процессы повторяются. Изменение показания счетчика за каждый цикл пропорционально приращению индукции  $\Delta B$ .

Величину  $\Delta H$  за каждый цикл можно измерять цифровым вольтметром с помощью преобразователя Холла или измерительной катушки напряженности поля  $W_2$ , помещенной на поверхности образца, тем же способом, что и при измерении индукции. Направление намагничивающего тока изменяют переключателем  $\Pi$ .

Наиболее интересным узлом здесь является преобразователь  $u \rightarrow f$ , работающий в диапазоне  $0,1 \text{ мв} - 1,2 \text{ в}$  с чувствительностью  $100 \text{ кгц/в}$  или  $100 \text{ гц/мв}$ . Такой же преобразователь используют и в установке для определения произведения  $Sw$  измерительных катушек (рис. 3).

Так как изменение магнитного потока

$$\Delta \Phi = \int_{t_1}^{t_2} e \, dt = Sw \int_{t_1}^{t_2} \frac{dB}{dt} \, dt = Sw \int_{B_1}^{B_2} dB = Sw (B_2 - B_1),$$

то

$$Sw = \frac{\int_{t_1}^{t_2} e \, dt}{B_2 - B_1}.$$

Принцип действия данной установки следующий. Генератор пилообразного тока  $I$  задает величину намагничивающего тока. Э. д. с.  $\varepsilon$  в измерительной катушке  $W_3$ , пропорциональная изменению потока, преобразуется преобразователем 2 в частоту, которая через электронный ключ 3 подается на счетчик 4. Для определения пределов интегрирования, т. е. времени, в течение которого ключ открыт, рядом с измерительной катушкой помещены два преобразователя ядерного магнитного резонанса  $W_1$  и  $W_2$ . На выходе одного из них появляется сигнал, когда индукция в зазоре становится равной  $B_1$ , на выходе другого, — когда индукция  $B = B_2$ . Эти сигналы, проходя через усилители 6, 7, 5 и воздействуя на ключ 3, открывают и закрывают его. Таким образом, ключ задает пределы интегрирования от  $B_1$  до  $B_2$ .

Вследствие большой крутизны изменения э. д. с. в измерительной обмотке применение в данном случае программ, показанных на рис. 1, б, в,

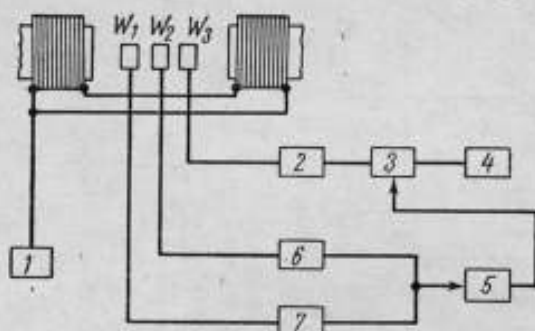


Рис. 3. Структурная схема автоматического устройства для измерения постоянной измерительной катушки.

не позволяет использовать преобразователи  $u \rightarrow f$ . Аналоговые же интеграторы для определения среднего значения пикообразной кривой должны быть широкополосными, что трудно выполнимо. Таким образом, пока не представляется возможности использовать эти программы для автоматизации процесса регулирования намагничивающего тока при определении статических магнитных характеристик. Однако программа на рис. 1, в

может быть применена в автоматических приборах, служащих, например, для определения средней магнитной проницаемости при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями.

В Ленинградском политехническом институте им. М. И. Калинина сделаны попытки разрешить вопросы автоматизации получения статических магнитных характеристик. В частности разработана схема генератора, позволяющего получить все три программы, изображенные на рис. 1.

Структурная схема подобного генератора для получения программ, показанных на рис. 1, а и в, приведена на рис. 4. Намагничивающий ток задается источником стабильного напряжения ИСН с помощью сопротивлений  $R_1 - R_n$  и ключей  $K_1 - K_n$ , в качестве которых используют малогабаритные реле. Работой реле управляет мультивибратор  $M$  через триггеры  $T_1 - T_i$  и дешифратор ДШ. При разомкнутом ключе  $K$  программа, задаваемая генератором, имеет вид, показанный на рис. 1, в; при замкнутом ключе программа близка к показанной на рис. 1, а.

Если вместо ИСН использовать источник постоянного напряжения со средней точкой и автоматически действующий переключатель полярности питающего напряжения, то с помощью такого устройства можно получить также программу, изображенную на рис. 1, б.

Этот же генератор совместно с генератором синусоидального тока может быть использован для получения характеристик при одновременном намагничивании постоянными и переменными полями. Для измерения средней магнитной проницаемости выполняют преобразование  $u \rightarrow u_c \rightarrow t \rightarrow f \rightarrow$  цифра. Напряжение на измерительной обмотке в данном случае заря-

жает конденсатор до напряжения  $u_c = U_m$ , где  $U_m$  — амплитуда напряжения на измерительной обмотке. Затем конденсатор разряжается по линейному закону так, что длительность  $t$  разряда оказывается пропорциональной  $u_c$ . Импульс длительностью  $t$  управляет ключом, через который на счетчик подается напряжение от генератора образцовой частоты. Число, записанное счетчиком, пропорционально значению индукции при данных  $S$  и  $\omega$ . Однако режим работы измерительного устройства задается таким, что на отсчетной шкале появляется число, пропорциональное проницаемости  $\mu_\Delta$ . Для этого амплитуда переменного тока  $I_m$ , а следова-

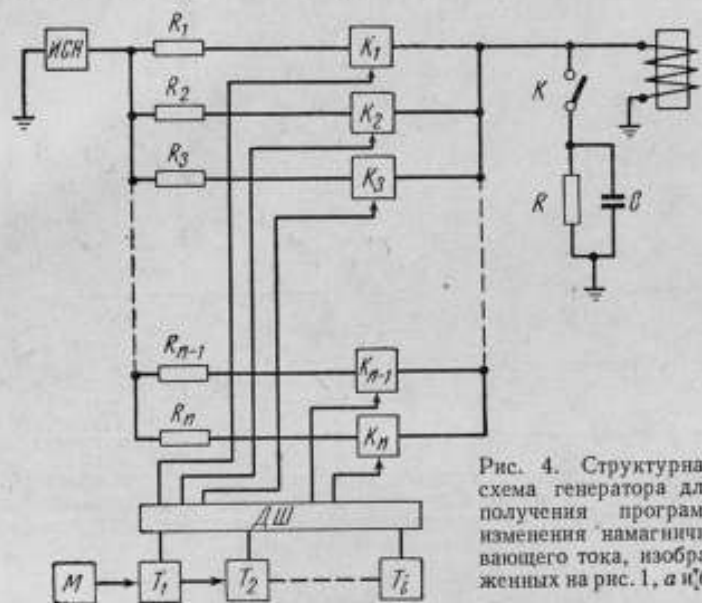


Рис. 4. Структурная схема генератора для получения программ изменения намагничивающего тока, изображенных на рис. 1, а и б.

тельно, и переменная составляющая напряженности намагничивающего поля  $H_m$  поддерживаются постоянными. Тогда

$$\mu_\Delta = \frac{B_m}{H_m} = K_1 \frac{U_m}{I_m} = K_2 U_m,$$

где  $B_m$  — индукция, соответствующая переменной составляющей напряженности намагничивающего поля.

Кроме шкалы  $\mu_\Delta$  измерительное устройство может иметь также шкалу  $H$  и отсчетное устройство с двумя шкалами, которое выдает зависимость  $\mu_\Delta = f(H)$ .

Описанный способ применим в тех случаях, когда искажение кривой напряжения невелико.

#### Определение динамических характеристик

Для получения динамических кривых намагничивания известны, в частности, установки для контроля листов электротехнической стали, разработанные Р. И. Янусом и Ю. А. Вдовиним, а также в Армянском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института электромеханики (АФВНИИЭМ) [2]. Задаваемое значение индукции в этих установках автоматически поддерживается постоянным специальными регуляторами. Интересно и то, что результаты измерения индукции здесь не зависят от сечения образца.

В рассматриваемых установках среднее значение напряжения на зажимах измерительной обмотки  $U'_{cp}$  измеряют при напряженности поля, соответствующей индукции насыщения. Тогда для данной частоты и определенного сорта стали  $U'_{cp}$  можно считать функцией только сечения  $S$  образца. Измеряя  $U_{cp}$ , соответствующее заданной индукции, и вычисляя отношение  $\frac{U_{cp}}{U'_{cp}}$ , исключают зависимость результатов измерения от сечения образца.

Наиболее просто определить отношение двух каких-либо напряжений  $\frac{U_1}{U_2}$  с помощью нелинейного сопротивления  $R_{нл}$ , гиперболически зависящего от  $U_2$ :

$$R_{нл} = \frac{A}{U_2},$$

где  $A$  — постоянный коэффициент.

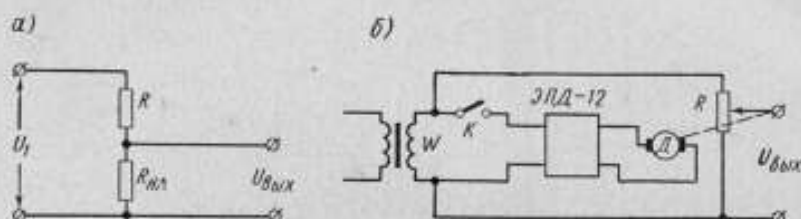


Рис. 5. Принципиальные схемы цепи с гиперболическим сопротивлением для определения отношения двух напряжений (а) и автоматической установки АФВНИИЭМ с гиперболическим сопротивлением для измерения магнитной индукции (б).

Принцип действия цепи, позволяющей получить указанное отношение, поясняется рис. 5, а.

Напряжение  $U_1$  приложено к двум последовательно включенным сопротивлениям — линейному  $R$  и нелинейному  $R_{нл}$ , причем  $R_{нл} = \frac{A}{U_2}$ . При  $R \gg R_{нл}$  напряжение  $U_{вых}$  на сопротивлении  $R_{нл}$  будет равно

$$U_{вых} = U_1 \frac{R_{нл}}{R + R_{нл}} = \frac{U_1 R_{нл}}{R} = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{A}{R} = K \frac{U_1}{U_2}.$$

В установке АФВНИИЭМ в качестве  $R_{нл}$  используют гиперболический делитель напряжения, а индукцию измеряют следующим образом. При замкнутом ключе  $K$  (рис. 5, б) напряжение на катушке  $W$  для измерения индукции, пропорциональное индукции насыщения, подается на электронный компенсатор типа ЭПД-12. Угол поворота  $\alpha$  двигателя  $D$  этого прибора пропорционален  $U'_{cp}$ , т. е.  $\alpha \equiv U'_{cp} \equiv S$ . Передаточный коэффициент  $K_n$  гиперболического сопротивления, движок которого связан с двигателем прибора, обратно пропорционален  $\alpha$ , т. е.

$$K_n \equiv \frac{1}{\alpha} \equiv \frac{1}{U'_{cp}} \equiv \frac{1}{S}.$$

Следовательно, положение движка на сопротивлении  $R$  определяется величиной  $U_{cp} = F(S)$ .

Если при разомкнутом ключе  $K$  на сопротивление  $R$  подать напряжение  $U_{\text{ср}}$ , то напряжение на выходе будет

$$U_{\text{вых}} = U_B = \frac{U_{\text{ср}}}{U'_{\text{ср}}}$$

и шкала прибора может быть проградуирована непосредственно в значениях индукции.

Недостаток использования гиперболического сопротивления  $R_{\text{нл}}$  с перемещающимся движком в качестве нелинейного сопротивления в данном случае заключается в том, что погрешность измерения индукции сильно возрастает, если сечение образца выходит за допустимые пределы.

Представляют интерес работы, в которых для определения магнитной проницаемости путем измерения отношения двух напряжений используют логометр. Эта идея, впервые предложенная В. Ф. Петровичем [3], нашла отражение и в разработках за рубежом [4]. При определении  $\mu$  как отношения амплитуд индукции  $B_m$  и напряженности поля  $H_m$  переменные напряжения  $U_B$  и  $U_H$ , пропорциональные  $B_m$  и  $H_m$ , выпрямляются и подводятся к двум рамкам логометра.

Таким образом,

$$I_B^2 \equiv U_B; \quad I_H \equiv U_H \quad \text{и} \quad \mu \equiv K \frac{I_B}{I_H},$$

где  $I_B$  и  $I_H$  — токи в рамках логометра.

Можно также определять  $\mu$  и двумя гальванометрами [4]. Отклонение стрелки одного из них пропорционально  $B_m$ , второго — пропорционально  $H_m$ . Точка пересечения стрелок гальванометров позволяет определить  $\mu$  по заранее построенной номограмме.

При получении динамических характеристик важной задачей является автоматическое разделение потерь на составляющие. Как известно, в настоящее время для разделения потерь, например на две составляющие — потери на гистерезис  $P_r$  и вихревые токи  $P_v$ , измеряют полные потери  $P_1$  и  $P_2$  при частотах  $f_1$  и  $f_2$ :

$$P_1 = af_1 + bf_1^2; \quad P_2 = af_2 + bf_2^2.$$

Затем определяют коэффициенты  $a$  и  $b$  и графическим или аналитическим путем вычисляют составляющие потерь:

$$P_r = af; \quad P_v = bf^2. \quad (1)$$

Подставив значения  $a$  и  $b$  в уравнения (1), получают

$$\left. \begin{aligned} P_r &= P_1 A_1 - P_2 A_2; \\ P_v &= P_2 A_3 - P_1 A_3; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  — постоянные коэффициенты, равные

$$A_1 = \frac{f_2}{f_2 - f_1}; \quad A_2 = \frac{f_1^2}{f_2(f_2 - f_1)}; \quad A_3 = \frac{f_1}{f_2 - f_1}.$$

Таким образом, разделение потерь на составляющие сводится к умножению величин  $P_1$  и  $P_2$  на соответствующие постоянные коэффициенты и вычитанию этих произведений согласно уравнениям (2).

Целесообразно напряжение, пропорциональное мощности, преобразовывать в отрезок времени (длительность импульса)  $t = u = P$ , а постоянные коэффициенты задавать частотой. Тогда умножение  $t$  на  $f$  можно осуществлять электронным ключом  $K_1$ ,  $K_2$  или  $K_3$  (рис. 6), на один из входов которого подается импульс длительностью  $t = P$ , а на другой — частота  $f$ .

Кроме того, ключи должны иметь третий вход, на который подаются разрешающие сигналы от управляющего устройства УУ таким образом, чтобы при измерении мощности на частоте  $f_1$  открытыми были ключи  $K_1$  и  $K_2$ , а при измерении на частоте  $f_2$  — ключ  $K_3$ .

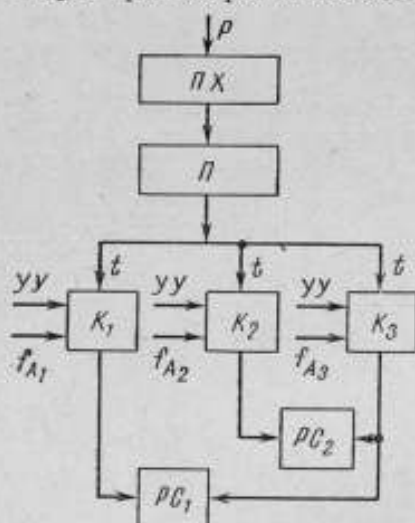


Рис. 6. Структурная схема устройства для автоматического разделения потерь на составляющие — потери на гистерезис и вихревые токи.

ПХ — преобразователь Холла; П — преобразователь  $u \rightarrow t$ ; УУ — управляющее устройство;  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  — электронные ключи;  $PC_1$  и  $PC_2$  — реверсивные счетчики.

время перемагничивания, напряженность стартового поля и др. Для большинства из них требуется определить отношение двух напряжений в аналоговой или цифровой форме.

### Заключение

Ближайшими задачами, связанными с автоматизацией процессов определения статических характеристик, являются разработка и усовершенствование:

- 1) генераторов, задающих программы изменения намагничивающего тока;
- 2) цифровых интеграторов (преобразователей  $u \rightarrow f$ ) или аналоговых;
- 3) устройств, осуществляющих в аналоговой или цифровой форме операции деления двух напряжений, необходимых, в частности, для определения магнитной проницаемости.

Для автоматизации процессов определения динамических характеристик необходимо в первую очередь разработать и усовершенствовать:

- 1) преобразователи напряжения в частоту или интервал времени;
- 2) устройства для определения отношений двух напряжений;
- 3) устройства, позволяющие автоматически разделять потери на три составляющие — потери на гистерезис, вихревые токи и дополнительные.

В отдельных случаях требуются генераторы с автоматической программой регулировки намагничивающего тока.

пропорциональные коэффициентам  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$ , могут быть заданы генератором образцовой частоты и соответствующими делителями частоты. Вычитание указанных выше произведений на выходе ключа осуществляется двумя реверсивными счетчиками  $PC_1$  и  $PC_2$ .

### Определение характеристик ферритовых сердечников

В большинстве установок для измерения параметров ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса (ППГ) в импульсном режиме в качестве выходного указателя используют электронно-лучевую трубку. Подобный указатель обладает малой точностью и требует дополнительных расчетов для определения почти всех параметров. В то же время импульсные программы намагничивания здесь почти полностью автоматизированы [5, 6, 7].

Необходимо измерять следующие характеристики ферритовых сердечников: коэффициенты прямоугольности, квадратности и перемагничивания,

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Sapptuller H. Vollautomatisches Magnetwerkstoff-Prüfgerät mit Analog-Digital-Wandlern. «Z. Instrum.», 1962, Bd. 70, № 11.
2. Атоян П. В., Хачатрян П. О. Установка для быстрого измерения магнитных характеристик электротехнической стали на целых листах. Исследование схем и аппаратуры для магнитных и электрических измерений. Киев, «Наукова думка», 1964.
3. Петровичко В. Ф. Измеритель магнитной проницаемости ( $\mu$ -метр) с непосредственным отсчетом. Киев, «Автоматика», 1957, № 1.
4. Valtdjiev. A. Sur quelques nouveaux instruments pour mesurer la permeabilite. АСТА ИМЕКО, 1961, 25—BU—164.
5. Визун Ю. И. Прибор для изучения свойств магнитных сердечников. Сб. «Магнитные элементы устройств вычислительной техники». М.—Л., Изд. АН СССР, 1961.
6. Грязнов А. П. Автомат для отбора ферритовых колец по эталонному кольцу. «Приборостроение», 1957, № 8.
7. Новопашенный Г. Н., Ясенский А. Н. Автоматический цифровой прибор для измерения импульсных параметров ферритов с ППГ. ЛДНТП, 1964.

### ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Широкое применение магнитных материалов в различных областях техники требует непрерывного совершенствования методов их измерений, а также создания измерительных приборов и установок для массовых измерений материалов с высокой точностью. Такие приборы и установки должны быть высокопроизводительными.

При разработке новых материалов приходится определять магнитные характеристики большого количества экспериментальных образцов и в первую очередь их статические параметры.

В настоящее время статические испытания магнитных материалов предусматриваются рядом стандартов, общесоюзных нормалей и технических условий. При этом обычно нормируют следующие величины: магнитную индукцию  $B_m$  на основной коммутационной кривой намагничивания при заданной напряженности поля, остаточную индукцию  $B_r$ ,

коэффициенты прямоугольности  $\alpha = \frac{B_r}{B_m}$  и квадратности\*  $K = \frac{B \left( -\frac{4}{6} H_c \right)}{B \left( \frac{4}{3} H_c \right)}$  петли гистерезиса при заданном значении максимальной

напряженности поля ( $5H_c$ ), коэрцитивную силу  $H_c$ , начальную проницаемость  $\mu_{нс}$ , проницаемость  $\mu_H$  при заданной напряженности поля  $H$  и др. Эти величины могут быть определены на баллистических установках путем коммутации тока по заданной программе в намагничивающей цепи образца.

Отечественная промышленность выпускает универсальные установки (например, БУ-3), на которых измерительные операции производят вручную. При этом большая и наиболее дорогостоящая часть устройств, входящих в комплект установки (например, пермеаметр сильных полей), для измерений кольцевых образцов не используется.

Изготовление же баллистических установок каждым предприятием приводит к тому, что техника измерений на этих установках различна и производительность их незначительна. Поэтому весьма актуальным является создание и выпуск в достаточном количестве небольшой полуавтомати-

\* Коэффициент квадратности служит критерием возможности использования ферритов с прямоугольными петлями гистерезиса в схемах совпадения импульсов.



ческой установки для статических испытаний кольцевых образцов магнитномягких материалов. Авторы предлагают один из возможных вариантов такой установки, которая состоит из следующих узлов (рис. 1):

1) полупроводникового регулятора тока *РТ* с двумя одинаковыми каналами *I*, *II* и амперметрами  $A_1$ ,  $A_2$  для контроля тока; *РТ* позволяет в течение 3—4 сек устанавливать требуемое значение тока;

2) манипулятора *М*, автоматически осуществляющего магнитную подготовку образца и измерительного прибора, коммутацию тока и возвращение всех цепей в исходное состояние в течение 9—10 сек;

3) микровеберметра  $\Phi$ -18, измеряющего изменение магнитного потока.

В установку может быть включен также автоматический самопишущий потенциометр для записи результатов измерений. Принципиальная схема установки показана на рис. 2 и 3.

Каждый канал регулятора тока \* *РТ* включает в себя три мощных транзистора П4А, которые служат для регулирования тока в цепи обмотки

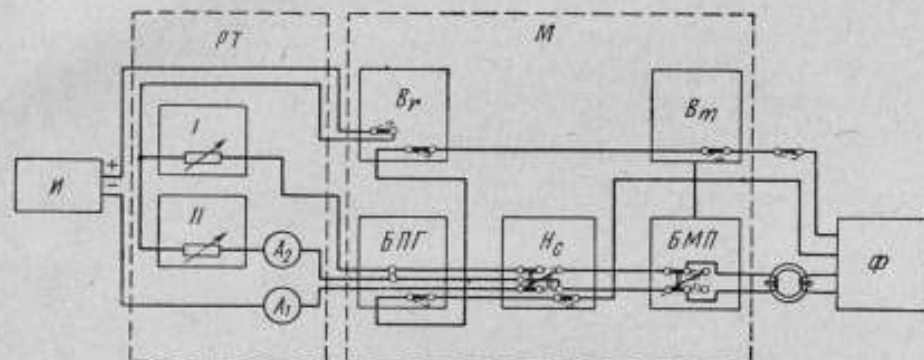


Рис. 1. Блок-схема установки.

*И* — источник; *РТ* — полупроводниковый регулятор тока; *М* — манипулятор;  $\Phi$  — микровеберметр типа  $\Phi$ -18; БМП — блок магнитной подготовки образца; БПГ — блок снятия точек петли гистерезиса.

образца, и два транзистора П201, предназначенных для управления током, проходящим через транзисторы П4А. Управление П201 осуществляется переменными резисторами  $R_2$ — $R_4$ ,  $R_6$ — $R_{10}$ , рукоятки которых выведены на переднюю панель пульта управления. Грубая регулировка производится при помощи сдвоенных переменных резисторов  $R_2$ ,  $R_6$  в первом и  $R_8$ ,  $R_{10}$  — во втором каналах. Резисторы  $R_3$ ,  $R_7$  служат для точной установки рабочего тока;  $R_4$ ,  $R_8$  — для установки максимально используемого рабочего тока (при оперативной работе не используются). Регулятор тока может питаться от аккумуляторной батареи напряжением 12 в, емкостью 120 а·ч или от полупроводниковых стабилизированных источников постоянного тока, обеспечивающих стабильность рабочего тока не хуже 0,02%, что гарантирует суммарную погрешность определения напряженности поля не более  $\pm 1\%$  (при измерении тока прибором класса 0,5).

Манипулятор состоит из блоков: магнитной подготовки, коммутирования тока для измерения  $V_m$ ,  $V_r$ ,  $H_c$ , коммутирования тока для снятия точек петли гистерезиса, блока питания, а также системы управления и сигнализации (рис. 1), выведенной на пульт управления.

Блок магнитной подготовки включает в себя мультивибратор, усилитель мощности импульсов, электронное реле времени и реле переключения тока в обмотке образца, а также индикатор и кнопку включения.

\* Схема регулятора тока разработана В. Н. Еадюкиным.

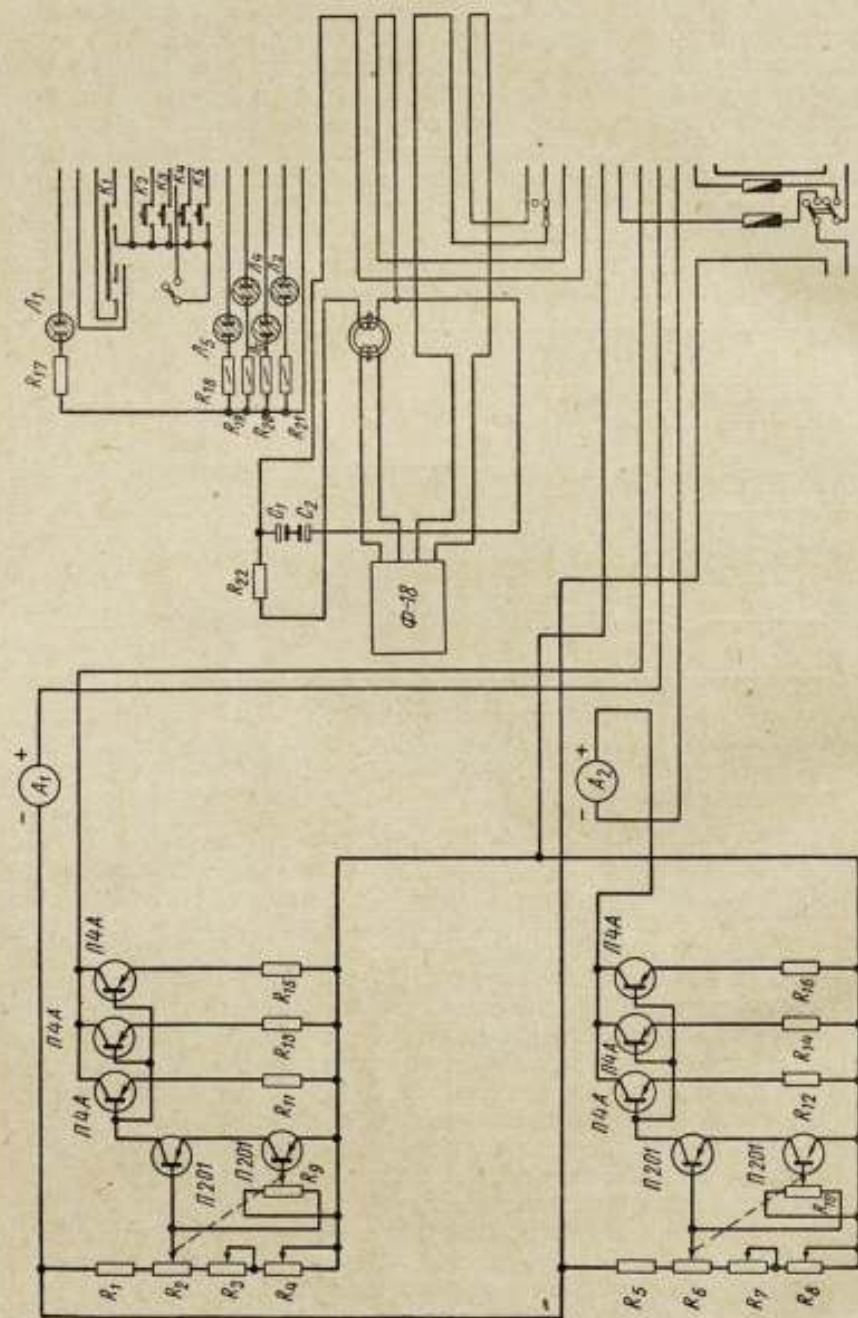


Рис. 2. Принципиальная схема пульты управления и регулятора тока установки.

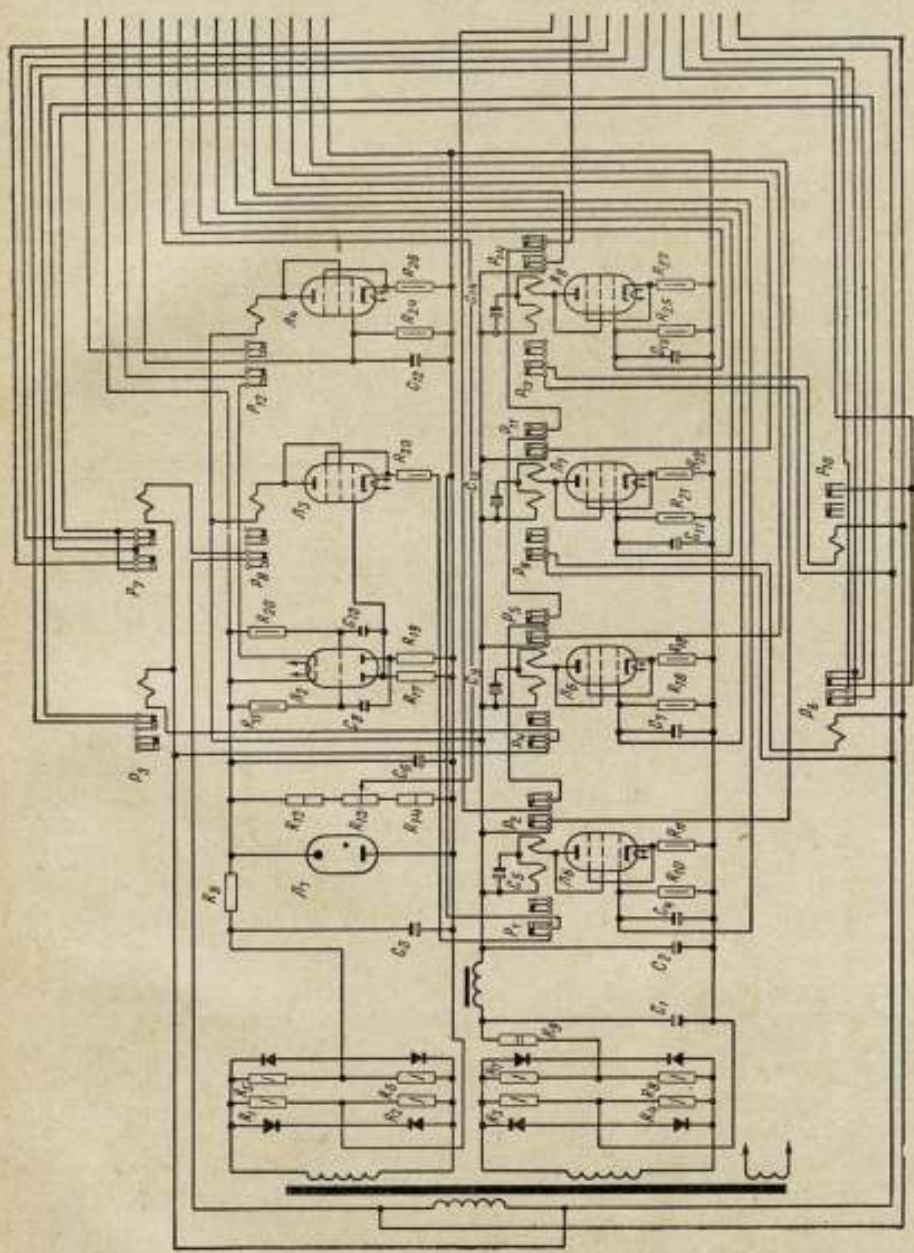


Рис. 3. Принципиальная схема манипулятора установки.

Мультивибратор с частотой колебаний 0,5 гц собран на лампе  $L_2$  (рис. 2 и 3). Прямоугольные импульсы с анода  $L_2$  подаются на усилитель мощности импульсов, собранный на лампе  $L_3$ . Для того чтобы исключить переходный конденсатор между анодом  $L_2$  и управляющей сеткой  $L_3$ , резисторы  $R_{17}$  и  $R_{19}$  анодной нагрузки мультивибратора соединены с корпусом непосредственно, а анодное питание мультивибратора осуществляется подачей на катод  $L_2$  отрицательного напряжения 75 в.

Анодной нагрузкой усилителя мощности служит обмотка промежуточного реле  $P_8$ . Контакты его замыкают либо размыкают цепь обмотки реле  $P_7$  переключения направления тока.

Электронное реле времени собрано на лампе  $L_4$ , анодной нагрузкой которой служит обмотка реле  $P_{12}$ . Нажатием кнопки  $K_1$  на управляющую сетку  $L_4$  и разрядный конденсатор  $C_{12}$  подается отрицательное напряжение. При этом  $L_4$  запирается, вследствие чего срабатывает  $P_{12}$  и его контакты замыкаются. При замыкании контактов размыкается цепь питания неоновой лампочки индикатора блока магнитной подготовки и лампочка гаснет. Вторая пара контактов  $P_{12}$  подает анодное питание на мультивибратор, но полностью эта цепь замкнется после нажатия  $K_1$ . При этом мультивибратор начнет работать, а конденсатор  $C_{12}$  разряжаться через резистор  $R_{24}$ . Время разряда данной цепи до момента отпирания  $L_4$  составляет 4—10 сек и может регулироваться переменным резистором  $R_{13}$ . При отпирании  $L_4$  схема возвращается в исходное состояние.

В блок коммутирования тока для измерения  $V_m$  входят: электронное реле времени, реле для размыкания анодного тока лампы  $L_3$ , а также индикатор и кнопка включения. Электронное реле времени собрано на лампе  $L_5$ , анодной нагрузкой которой служат обмотки двух реле:  $P_1$  и  $P_2$ . Реле  $P_1$  снабжено замедляющим конденсатором  $C_3$ , его контакты размыкают цепь анодного тока  $L_3$  усилителя мощности импульсов. При размыкании этой цепи происходит однократное переключение контактами реле  $P_7$  направления тока в цепи обмотки образца. При замыкании кнопки  $K_2$  контакта отрицательное напряжение подается на управляющую сетку лампы  $L_5$  и конденсатор  $C_4$ . При этом срабатывает  $P_2$ , его контакты размыкают цепь питания неоновой лампочки индикатора и цепь установки нуля прибора Ф-18. Лампочка гаснет, а прибор подготавливается к работе. Через секунду после срабатывания  $P_2$  срабатывает  $P_1$  и своими контактами размыкает цепь анодного тока  $L_3$ . Кнопку  $K_3$  отпускают, и конденсатор  $C_4$  разряжается через резистор  $R_{10}$  в течение 4—5 сек до момента отпирания  $L_5$ . Этого времени достаточно, чтобы снять и записать показание прибора Ф-18. При отпирании  $L_5$  схема возвращается в исходное состояние.

Блок коммутирования тока для измерения  $V_r$  состоит из таких же узлов, что и блок для измерения  $V_m$ ; принцип их работы одинаков. Однако реле  $P_3$  здесь служит для выключения тока через обмотку образца.

Блоки коммутирования тока для измерения  $H_c$  и для снятия точек петли гистерезиса состоят из таких же узлов и действуют по такому же принципу, что и описанные выше; однако в первом реле  $P_6$  служит для переключения каналов регулятора тока, а во втором реле  $P_{10}$  служит для изменения намагничивающего тока в обмотке образца при неизменном его направлении.

Пульт управления содержит кроме рукояток регулировки тока, проходящего через обмотку образца, кнопки управления блоками измерения  $V_m$ ,  $V_r$ ,  $H_c$  и снятия точек петли гистерезиса, а также тумблеры ручного включения блока измерения  $H_c$ , ручного размыкания цепи установки нуля прибора Ф-18 и тумблеры включения питания установки. На пульте размещены индикаторные лампочки этих блоков.

Блок питания манипулятора включает в себя два выпрямителя: один на постоянном напряжении 150 в для анодного питания лампы усилителя мощности импульсов и ламп электронных реле времени; второй — на постоянном стабилизированном напряжении — 75 в для анодного питания мультвибратора и питания зарядных цепей электронного реле времени. Выпрямители собраны по мостиковой схеме на полупроводниковых диодах Д7Е. Погрешность за счет нестабильности нуля микроверметра Ф-18 почти полностью исключается благодаря размыканию цепи обратной связи фотоэлектрического усилителя прибора в момент измерения, что обеспечивает сползание нуля не более чем на 0,5 деления за время измерения на самом чувствительном пределе; на более грубых пределах сползание нуля значительно меньше.

### Выводы

1. При статических испытаниях магнитномягких материалов описанная установка позволяет значительно повысить производительность труда по сравнению с выпускаемыми промышленностью баллистическими установками. Определение отдельных точек кривой намагничивания занимает 10—15 сек, включая магнитную подготовку. При этом возможна запись результатов измерений на самопишущем потенциометре.

2. Погрешность измерений на такой установке не превышает погрешности измерений на стандартных баллистических установках.

3. Для работы на установке не требуется высокой квалификации персонала, кнопочное управление сводит к минимуму возможные ошибки.

4. Установка имеет небольшие габариты, ее вес не более 15 кг (без источника постоянного тока).

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Статические и динамические (при намагничивании периодическим магнитным полем) магнитные характеристики магнитномягких материалов, методы и аппаратура для их определения</b>	
О. Н. Альтгаузен. О выборе магнитных характеристик магнитномягких сплавов для нормативных документов и в качестве справочных . . . . .	5
Л. Ш. Казарновский. О выборе магнитных характеристик электротехнических сталей для государственных стандартов, технических условий и в качестве справочных . . . . .	13
Е. Н. Чечурин. Электроизмерительные приборы непосредственной оценки для определения магнитных характеристик материалов в переменных полях частотой до 10 кГц . . . . .	16
И. И. Кифер. Измерительные устройства для наблюдения и записи квазистатических и динамических кривых намагничивания магнитномягких и магнитотвердых материалов . . . . .	25
Н. Г. Чернышева. Методы и аппаратура для определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов при намагничивании переменным периодическим полем сверхзвуковых частот . . . . .	36
А. Ф. Кугаевский. Измерение характеристик ферромагнитных материалов на переменном токе частотой выше 1 МГц . . . . .	45
Л. М. Пестова. О методе определения магнитной индукции в ленточных сердечниках . . . . .	56
Н. П. Горячев, В. М. Юрченко. О частотных и фазовых характеристиках интегрирующих устройств для магнитных измерений . . . . .	59
<b>Статические и динамические магнитные характеристики магнитотвердых материалов, методы и аппаратура для их определения</b>	
Е. Г. Шрамков. О характеристиках магнитотвердых материалов и постоянных магнитов для нормативных документов и о справочных характеристиках . . . . .	67
И. Д. Подольский. О магнитных характеристиках магнитотвердых материалов для роторов гистерезисных двигателей . . . . .	72
И. Д. Подольский. Магнитоизмерительная аппаратура для исследования магнитотвердых материалов в динамическом режиме . . . . .	78
П. П. Маркин, В. Н. Титаренко. Аппаратура для контроля характеристик литых постоянных магнитов в массовом производстве . . . . .	82
Н. Е. Февралева. Аппаратура для исследования магнитных характеристик магнитотвердых материалов и постоянных магнитов в лабораторных условиях . . . . .	86
В. В. Буравлев, П. П. Маркин. Установка для определения индукции и напряженности поля постоянных магнитов в любой точке предельной петли гистерезиса . . . . .	91
В. И. Зайцев, С. А. Спектор, Е. Г. Шрамков. Методы и аппаратура для исследования стабильности и температурного коэффициента постоянных магнитов и систем с постоянными магнитами . . . . .	97

**Магнитные характеристики ферромагнитных материалов,  
применяемых при импульсном намагничивании,  
и тонких магнитных пленок; методы и аппаратура для их определения**

А. И. Пирогов, Ю. М. Шамаев. Статические и динамические характеристики, методы измерений и требования к аппаратуре для исследования и контроля магнитных сердечников с прямоугольной петлей гистерезиса . . . . .	108
Ю. В. Картавых, Т. К. Кракау. Аппаратура для определения характеристик малогабаритных ферромагнитных сердечников из материалов с прямоугольной петлей гистерезиса . . . . .	118
А. Э. Векслер. Методы и аппаратура для определения магнитных характеристик материалов в режиме заданного импульсного напряжения . . . . .	125
К. М. Поливанов, А. Л. Фрумкин. Определение свойств тонких магнитных пленок . . . . .	135
А. И. Буржистров, Н. А. Крупин. Аппаратура и методика измерения коэрцитивной силы смещения и напряженности поля анизотропии тонких магнитных пленок радиочастотным методом . . . . .	153
Ю. Д. Волков, Т. И. Кузина. Определение магнитоупругой константы тонких магнитных пленок с использованием радиочастотного метода измерения напряженности поля анизотропии . . . . .	156
П. М. Рыбак. Об измерении магнитной проницаемости ферромагнитных пленок в диапазонах метровых и дециметровых волн . . . . .	159
Д. И. Зорин, Г. Н. Новопащенко, Е. Г. Шрамков. Пути автоматизации измерительных устройств для определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов . . . . .	163
В. М. Мельник, Л. Н. Тульчинский. Полуавтоматическая установка для определения статических характеристик магнитномягких материалов . . . . .	172

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
И ПУТИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ  
И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Труды метрологических институтов

Выпуск 95 (155)

Редактор *Н. Н. Александрова*

Техн. редактор *Л. Г. Баранова*

Корректор *Л. Н. Панина*

Сдано в набор 6/1 1967 г.

Подписано к печати 27/IV 1967 г. М-11901

Формат бумаги 70/108<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Печ. л. 11,25. 15,65 усл. л.

Уч.-изд. л. 14,2 Тираж 2000 экз. Цена 1 р. 14 к.

Заказ № 1418

Издательство стандартов

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР  
Ленинград, ул. Моисеенко, 10

Г

С

В

С

О

Ч

С

Т

Х

Д

Р

С

С

Я

М

Ш

С

Р

В

И

Г

Д

И

17



#### ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
22	Табл. 2 (гр. 4) 1-я сверху	500—10 000	50—1000
43	23-я снизу	$= 10^{-7} \pm 10^2 \text{ ом}$	$= 10^{-4} \pm 10^2 \text{ ом}$
72	14-я сверху	гидро-	гиро-
81	26-я »	ВНИИЭМ	ВНИИМ
137	24-я снизу	проецируется	просцируется

Современное состояние и пути развития методов и аппаратуры для исследования ферромагнитных материалов. Выпуск 95 (156).

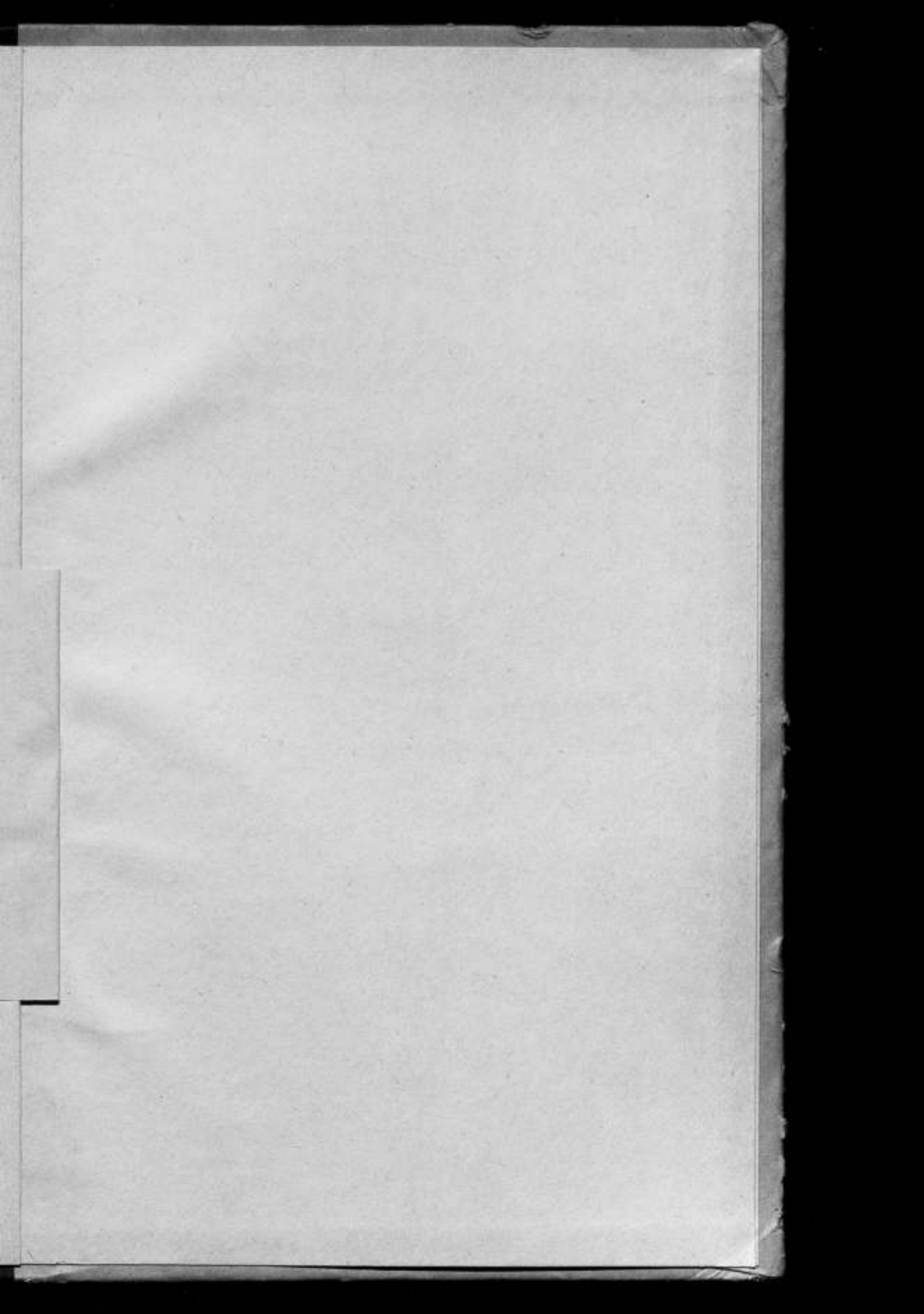
Заказ 1418

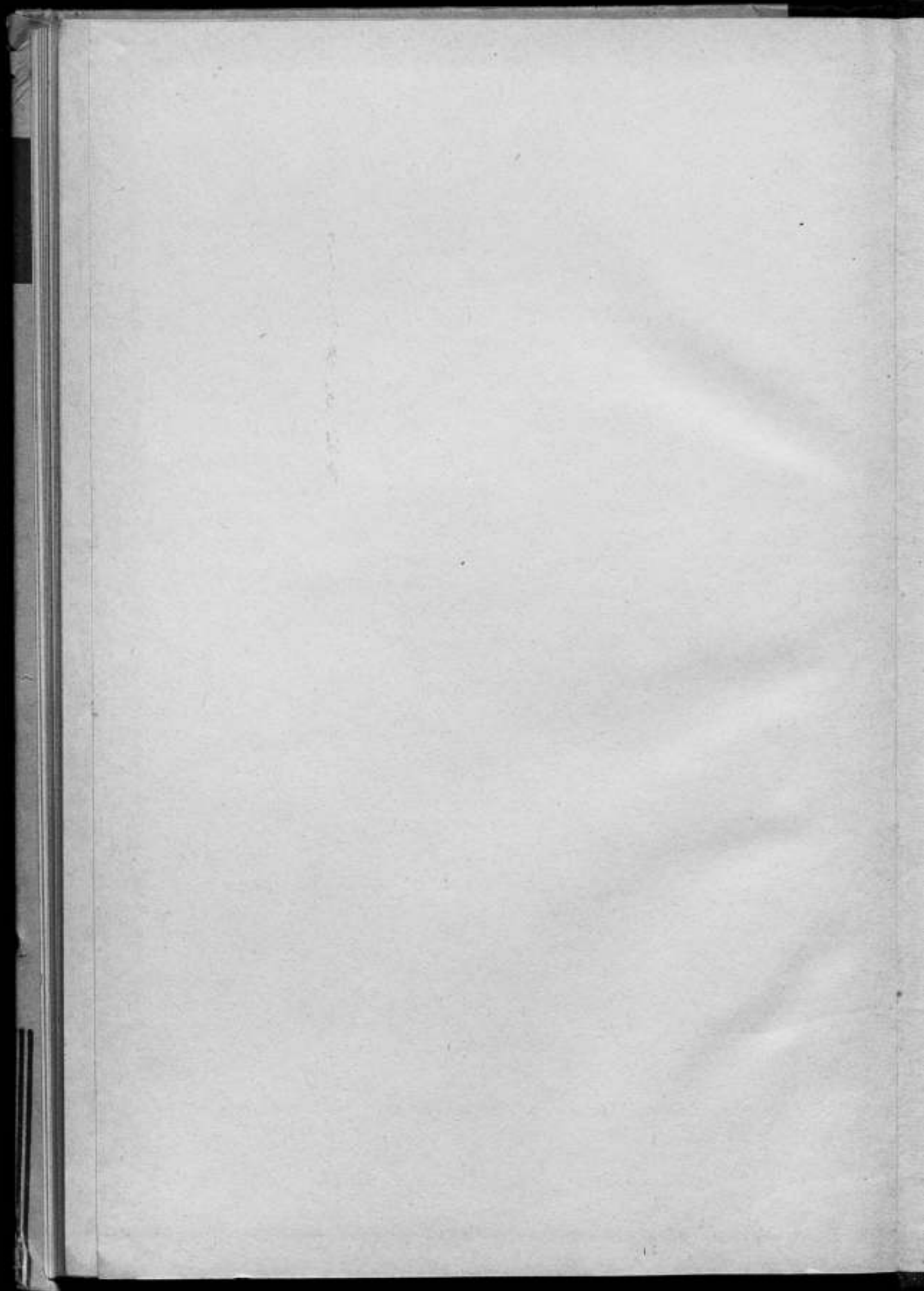
Г  
С  
И  
С  
О  
Ч  
Е  
Т  
Х  
Д  
Р  
О  
С  
  
Л  
М  
Н  
С  
Р  
В  
И  
Г  
Д  
Н  
17

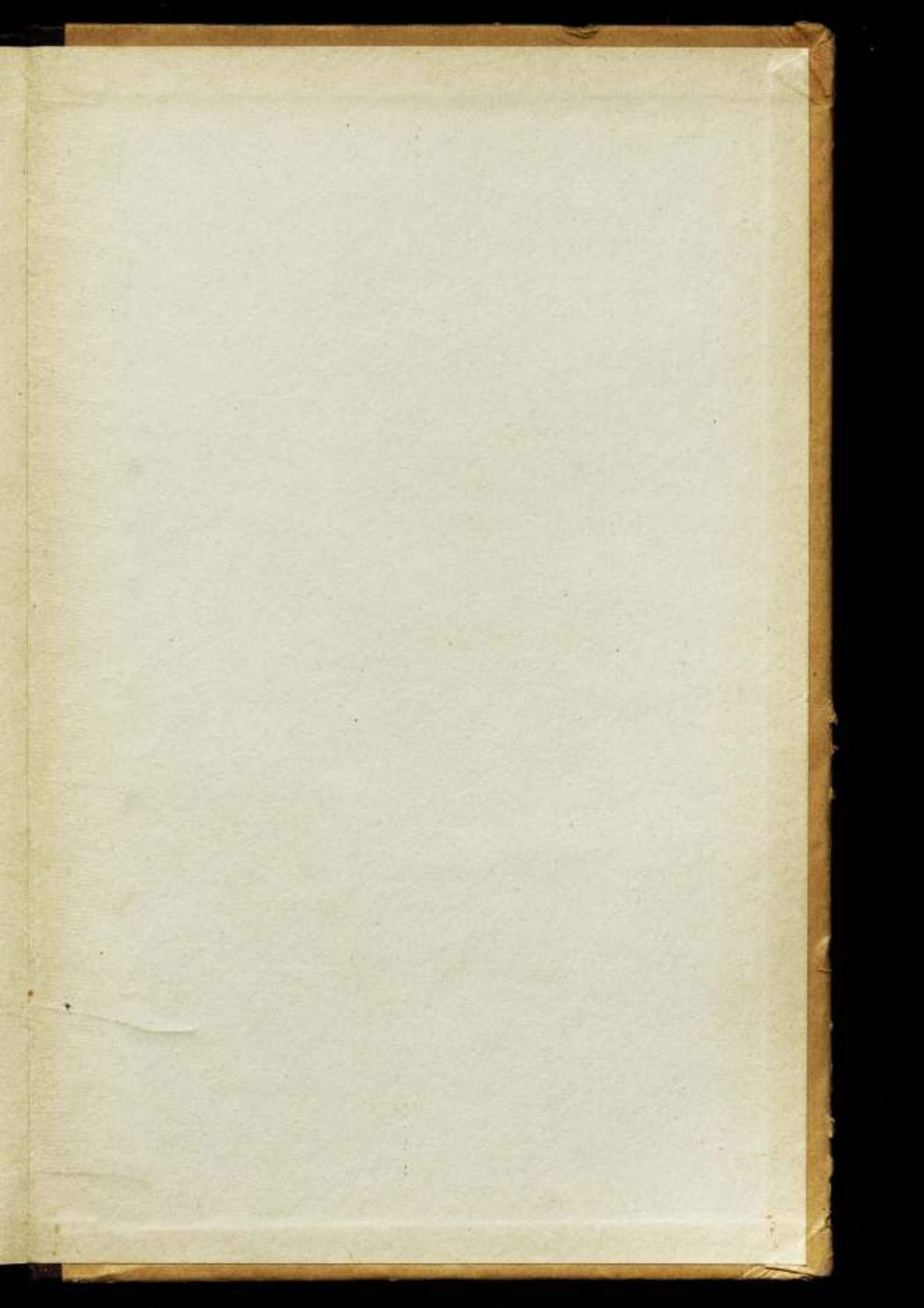
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
И ПУТИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ  
И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Труды метрологических институтов

Выпуск 95 (155)







1 р. 14 к.