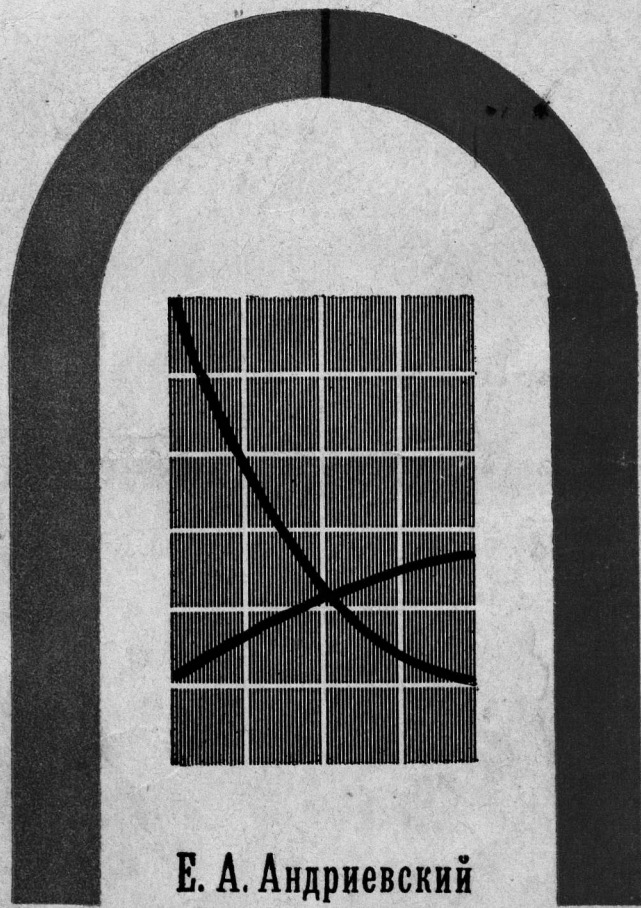


531-88-03 Азия

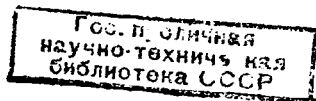


Е. А. Андриевский
ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Е. А. АНДРИЕВСКИЙ

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

**Киев • „Техніка“
1977**



577
54

6П2.1.06

A65

УДК 621.317.44

277-57498a

Измерение параметров постоянных магнитов. Андриевский Е. А. Киев, «Техніка», 1977, 152 с.

Рассмотрены новые методы и устройства для определения магнитных параметров материала при испытании постоянных магнитов. Значительное внимание уделено анализу устройств с неполностью замкнутой магнитной системой, автоматизации процессов измерения, способам построения цифровой автоматической аппаратуры. Приведено описание схем и устройств для создания импульсных и стационарных намагничивающих и размагничивающих полей, необходимых при испытании постоянных магнитов. Рассмотрены вопросы оптимизации параметров импульсных намагничивающих устройств, методы стабилизации амплитуды намагничивающего поля и повышения быстродействия намагничивающих устройств. Рассчитана на инженерно-технических работников, занимающихся магнитными измерениями. Может быть полезной студентам вузов соответствующих специальностей. Табл. 3, ил. 42, библиогр. 52.

Рецензент канд. техн. наук *В. И. Зингерман*

Редакция литературы по энергетике, электронике, кибернетике и связи

Заведующий редакцией инж. *З. В. Божко*

A $\frac{30403-007}{M202(04)-77}$ 44-77

© Издательство «Техніка», 1977 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Задачи дальнейшего повышения качества и эффективности производства, поставленные XXV съездом КПСС, неразрывно связаны с разработкой, исследованием и широким использованием новых прогрессивных материалов и технологических процессов. Среди таких материалов значительное место занимают магнитотвердые материалы. Без их использования практически невозможно создание многих устройств автоматики, электромашиностроения, радиоэлектроники, измерительной и вычислительной техники. В связи с этим производство изделий из магнитотвердых материалов из года в год увеличивается. Широко проводятся исследования, направленные на разработку новых и совершенствование существующих материалов для изготовления постоянных магнитов. Повышаются требования к точности и надежности устройств с постоянными магнитами и, соответственно, требования к качеству самих магнитов.

Все это определяет актуальность и необходимость разработки и внедрения более совершенных методов измерения магнитных свойств постоянных магнитов, соответствующих современным требованиям научно-исследовательских и производственных организаций. Эти методы должны основываться на использовании цифровой автоматической измерительной аппаратуры, обеспечивающей повышение точности измерения и высокое быстродействие. Кроме того, такая аппаратура должна позволять производить измерения

не только на специально подготовленных образцах материала, но и непосредственно на постоянных магнитах. В настоящей работе рассматриваются аналоговые и цифровые устройства с неполностью замкнутой магнитной системой для определения параметров магнитотвердых материалов. В таких устройствах обеспечивается универсальность типоразмеров испытываемых магнитов и возможность применения бескоммутационного метода измерения с использованием гальваномангнитных измерительных преобразователей, что позволяет осуществить автоматизацию измерительных операций.

Основными элементами аппаратуры для испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов являются устройства, создающие импульсные и стационарные намагничивающие и размагничивающие поля. Вопросам построения таких устройств и оптимизации их параметров в работе уделяется большое внимание. Рассматриваются возможности применения в качестве управляемых элементов импульсных и стационарных источников питания полупроводниковых тиристорных преобразователей. В книге использованы результаты научно-исследовательских работ, проведенных автором в Институте электродинамики АН УССР.

Автор выражает благодарность рецензенту В. И. Зингерману, чьи критические замечания способствовали улучшению книги.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 252601, Киев, 1, ГСП, Пушкинская, 28, издательство «Техніка».

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТКИ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Магнитное состояние среды, помещенной в магнитное поле, полностью описывается тремя величинами — магнитной индукцией, намагниченностью и напряженностью намагничивающего поля. Основными характеристиками магнитных материалов являются зависимости между намагниченностью (или индукцией) и напряженностью магнитного поля. Эти зависимости не имеют точного аналитического выражения и обычно определяются экспериментально. Графически наиболее часто они представляются кривыми намагничивания, предельными гистерезисными петлями и семействами симметричных или несимметричных частных гистерезисных петель, снятых при различных максимальных значениях напряженности намагничивающего поля.

В зависимости от предъявляемых требований и условий использования тех или иных магнитных материалов указанные характеристики могут определяться в статическом или динамическом режимах, при нормальной и отличных от нормальной температурах, в направлении магнитной текстуры или поперечном направлении, в сложных условиях намагничивания.

Значения отдельных, заранее обусловленных магнитных величин (индукции, напряженности поля, магнитной проницаемости и т. д.) в определенных точках магнитных характеристик являются магнитными параметрами того или

иногo магнитного материала. Такие параметры обычно оговариваются нормальями или стандартами и дают возможность сравнивать различные материалы и оценивать их магнитные свойства.

Применительно к магнитотвердым материалам основными характеристиками, необходимыми при расчетах и проектировании постоянных магнитов и систем с постоянными магнитами, а также при оценке их поведения в эксплуатационных условиях, являются размагничивающая часть предельной статической гистерезисной петли и частные гистерезисные петли возврата [21, 48]. Последние обычно характеризуются средней магнитной проницаемостью, определяемой по наклону частных петель. Такие характеристики необходимо определять при различных температурах в интервале от -180 до $+550^{\circ}\text{C}$.

Значительный интерес представляют также семейства кривых размагничивания и кривые возврата для различных значений напряженности намагничивающего поля, меньших напряженности, при которой обеспечивается получение предельной петли. Это связано с тем, что рабочие точки магнитов и магнитных систем часто бывают расположены на таких кривых. В отдельных случаях свойства постоянных магнитов характеризуются кривыми размагничивания, снятыми при намагничивании в полях, перпендикулярных магнитной текстуре, при направлении размагничивающего поля, перпендикулярном направлению намагничивания, или при одновременном воздействии взаимно перпендикулярных размагничивающих полей.

Основными параметрами магнитотвердых материалов принято считать остаточную индукцию, коэрцитивную силу по индукции и намагниченности, максимальную удельную магнитную энергию, значения индукции и напряженности поля, соответствующие максимальному значению магнитной энергии, коэффициент выпуклости кривой размагничивания и коэффициент возврата в точке максимальной магнитной энергии. Значения этих величин должны опре-

деляться для предельной кривой размагничивания, поэтому к основным параметрам материала следует отнести также значение напряженности намагничивающего поля, необходимого для доведения материала до насыщения. Указанные параметры достаточно полно характеризуют магнитные свойства магнитотвердых материалов и в более или менее полном виде нормируются обычно стандартами или другими документами, регламентирующими эти свойства.

Наряду с параметрами материалов следует различать параметры конкретных изделий, т. е. постоянных магнитов, изготовленных из этих материалов. Так как последние предназначены для создания в определенном объеме внешнего пространства магнитного поля, они могут характеризоваться значением магнитной индукции и ее распределением (в рабочем пространстве магнита или магнитной системы), а также изменением этих величин при воздействии различных дестабилизирующих факторов (температуры, внешних магнитных полей, ударов, вибрации и т. д.). На практике основными параметрами постоянных магнитов иногда принимают магнитный момент, кажущуюся остаточную индукцию или остаточный магнитный поток магнита.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ МАГНИТОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЕ

Требования, предъявляемые к магнитоизмерительной аппаратуре, и основные направления развития такой аппаратуры неразрывно связаны с вопросами рационального выбора магнитных характеристик и параметров, подлежащих измерению и контролю на различных стадиях разработки, исследования и производства магнитотвердых материалов и постоянных магнитов. Исходя из существующего

положения, в развитии аппаратуры для испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов можно выделить три основных направления.

Первое направление — разработка новых магнитотвердых материалов, аттестация стандартных образцов и конструирование различных изделий и магнитных систем с применением таких материалов. Все эти вопросы связаны с необходимостью получения и использования таких характеристик материала, как кривые размагничивания при нормальных и сложных условиях намагничивания (в том числе при температурах, отличающихся от нормальной), частные кривые размагничивания, предельные и частные гистерезисные петли, кривые возврата и т. д. Для этого необходима лабораторная аппаратура, позволяющая определять с максимально возможной точностью указанные характеристики материала на образцах правильной геометрической формы, заданных размеров и обладающих достаточно высокой однородностью магнитных свойств по всему объему. Соблюдение последнего условия особенно важно, так как в настоящее время пока не существует методов и аппаратуры, позволяющих контролировать однородность магнитных свойств и достаточно строго оценивать ее влияние на результаты и погрешности измерения характеристик материала.

Полученные характеристики должны служить основой для составления нормативных и справочных документов, используемых при производстве и проектировании изделий из магнитотвердых материалов.

Второе направление — это обеспечение процесса производства постоянных магнитов измерительной аппаратурой, позволяющей по результатам измерения магнитных характеристик или параметров судить о правильности проведения технологических режимов и вносить соответствующие коррективы. Так как нормативными документами обычно оговариваются параметры материала, в процессе производства должна использоваться аппаратура, позволяющая оп-

ределять именно эти величины. Таким образом, исходя из потребностей контроля технологических процессов, необходима разработка методов и аппаратуры, позволяющих определять параметры материала непосредственно на готовых изделиях.

Контроль за правильностью проведения технологического процесса можно осуществлять по немногим или даже по одному какому-либо параметру материала, наиболее чувствительному ко всяким нарушениям технологии. Таким параметром, в частности, может быть коэрцитивная сила. С точки зрения измерительной аппаратуры для решения задач технологического контроля необходима разработка автоматической аппаратуры, обладающей высоким быстродействием и позволяющей сравнительно просто осуществлять переход к различным типоразмерам испытуемых образцов. Этим требованиям отвечают устройства, основанные на дифференциальном методе измерения, при котором осуществляется одновременное или разновременное сравнение испытуемого магнита с образцовым.

Третье направление — передача готовых изделий, т. е. постоянных магнитов, от изготовителя к потребителю и контроль этих изделий в процессе их эксплуатации. Для решения задач приемо-сдаточных испытаний необходима специализированная и автоматизированная контрольно-измерительная аппаратура, позволяющая осуществлять измерение или контроль параметров материала либо параметров готовых изделий (в том числе потока, индукции, ее распределения в рабочем пространстве или иных величин) в условиях, близких к условиям эксплуатации. Для этого необходимы проведение исследований и разработка аппаратуры, позволяющей обеспечить имитацию условий, в которых предполагается использовать данное конкретное изделие, а также максимальную производительность и автоматизацию контрольных операций.

Из рассмотрения основных направлений разработки магнитоизмерительной аппаратуры следует, что необходимость

в определении параметров материала при испытании постоянных магнитов возникает в процессе их производства при контроле правильности проведения технологических режимов и при проведении прямо-сдаточных испытаний. Требования к измерительной аппаратуре в том и другом случае различны. Это различие состоит в том, что в первом случае испытывается небольшое количество различных по конфигурации постоянных магнитов, а во втором — значительные партии однотипных изделий.

Исходя из этого аппаратура, используемая при контроле технологических режимов, должна обладать бóльшей универсальностью по отношению к типоразмерам испытываемых изделий, а аппаратура для прямо-сдаточных испытаний — отличаться бóльшей степенью автоматизации подготовительных и контрольно-измерительных операций и более высоким быстродействием. Четкую границу между устройствами обеих групп провести довольно затруднительно, так как в ряде случаев, например при изготовлении небольших партий магнитов, задачи технологического контроля и прямо-сдаточных испытаний могут решаться на одной и той же аппаратуре. В отдельных случаях при отсутствии такой аппаратуры и испытании единичных образцов простой формы используются устройства, предназначенные для определения характеристик магнитотвердых материалов.

3. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Существующие в настоящее время методы и устройства для определения характеристик магнитотвердых материалов различают по характеру изменения размагничивающего поля (коммутационные или бескоммутационные методы измерения) и по типу использованной магнитной системы

(устройства с замкнутой и неполностью замкнутой магнитной системой) [27, 44, 47].

К устройствам с замкнутой магнитной системой относятся установка БУ-3, устройства Харьковского НИИ метрологии, Московского энергетического и Новочеркасского политехнического институтов. В этих установках используются коммутационные (индукционно-импульсный в первых двух и индукционно-непрерывный во вторых двух) методы измерения. Устройства с неполностью замкнутой магнитной системой представляются в настоящее время установкой У-5022 и устройствами Института электродинамики АН УССР, основанными на бескоммутационном методе измерения.

Наиболее распространенным устройством для испытания образцов магнитотвердых материалов в настоящее время продолжает оставаться установка БУ-3 завода «Точэлектроприбор». Это устройство — классическая баллистическая установка, обеспечивающая измерение магнитного потока непосредственно в самом образце. Поэтому она не требует градуировки и проверки по стандартным образцам и может быть использована для их аттестации.

Установка Харьковского НИИ метрологии предназначена для испытания образцов с повышенной точностью (погрешность измерения не более 2% от значений остаточной индукции и коэрцитивной силы) [30]. Она также основана на индукционно-импульсном методе измерения магнитной индукции. От установки БУ-3 это устройство выгодно отличается тем, что для намагничивания образцов в нем использовано импульсное намагничивание, а для измерения напряженности поля применены преобразователи Холла. По сравнению с установкой БУ-3 в этом устройстве расширен диапазон размеров испытываемых образцов и увеличена напряженность намагничивающего поля.

В установках Московского энергетического (МЭИ) [19] и Новочеркасского политехнического (НПИ) институтов [18] применяется индукционно-непрерывный метод измерения

магнитной индукции и напряженности поля при циклическом низкочастотном перемагничивании испытуемых образцов.

По точности измерения магнитных характеристик установка МЭИ не уступает устройствам с индукционно-импульсным методом измерения, что обеспечивается соответствующим выбором частоты и формы перемагничивающего поля. Ее достоинства — автоматическая запись петель гистерезиса и кривых возврата с помощью двухкоординатного самопишущего прибора, а также наличие в одной из ее модификаций специальной термокамеры и системы поддержания заданной температуры, позволяющих осуществлять измерение магнитных характеристик в широком диапазоне температур.

Установка НПИ проще устройства МЭИ, так как в ней отсутствуют элементы, регулирующие форму перемагничивающего тока; однако она имеет бóльшую по сравнению с рассмотренными выше устройствами погрешность измерения. Регистрация измеряемых характеристик осуществляется с помощью электронно-лучевого индикатора. Устройство предназначено для проведения заводских испытаний образцов магнитотвердых материалов и может быть использовано для определения характеристик постоянных магнитов простой формы.

Дальнейшим развитием этого устройства является феррометр для испытания постоянных магнитов [28]. В этой установке сигналы, снимаемые с индукционных преобразователей, после усиления измеряются с помощью управляемых выпрямителей и измерителей средних значений. Измерения осуществляются при частоте перемагничивающего тока 1 Гц, погрешность измерения до 5%. Назначение и область применения установки аналогичны предыдущей.

Общая особенность рассмотренных устройств — использование замкнутой магнитной системы в сочетании с индукционными методами измерения, что связано с необходимостью нанесения на испытуемые образцы обмоток для изме-

рения индукции. Неудобства, связанные с использованием измерительных обмоток, привели к разработке устройств с неполностью замкнутой магнитной системой. В таких устройствах измеритель индукции находится вне образца и устанавливается либо в зазоре магнитной системы, либо у торца магнита. Это позволяет использовать бескоммутационный метод измерения индукции.

В установках У-5022, М-1 и М-4, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью, используется двойная симметричная магнитная система. Эта система (выполненная в виде магнитного моста) за счет нарушения магнитной симметрии двух половин магнитопровода при помещении испытуемого образца обеспечивает выделение его потока из общего магнитного потока системы [51]. В установке У-5022 [44] в качестве измерителей индукции и напряженности поля используются преобразователи Холла, что позволяет непосредственно измерять напряженность поля, намагниченность и индукцию в любой точке кривой размагничивания. Для получения значений магнитной энергии в этих точках используется ферродинамический перемножающий прибор, показания которого пропорциональны произведению индукции и напряженности поля. Намагничивание образцов осуществляется однополярным импульсом тока разряда батареи конденсаторов (подключаемых через управляемый клапан к обмотке магнитной системы), размагничивание — постоянным током. Регулировка размагничивающего тока выполняется вручную в режиме измерения кривой размагничивания по точкам или автоматически — при записи кривой размагничивания с помощью двухкоординатного самопишущего прибора. Для непосредственного отсчета намагниченности и индукции в установке предусмотрена коррекция тока питания преобразователя намагниченности по длине и сечению образца. Погрешность измерения по отношению к остаточной индукции и коэрцитивной силе не более 3%. При записи на диаграммную бумагу погрешность не превышает 4%.

В отличие от установки У-5022 в устройствах М-1 и М-4 [38] индукция и напряженность поля измеряются индукционно-непрерывным методом. Индукция определяется с помощью измерительного генератора, а напряженность поля — вибрирующей катушкой. Для коррекции измерительной схемы по длине и сечению образцов используется дополнительное сопротивление, величина которого определяется с помощью графика, прилагаемого к установке. Погрешность измерения составляет 4% по отношению к остаточной индукции и коэрцитивной силе. Основным недостатком устройств с двойной симметричной магнитной системой является механическая сложность системы, необходимость строгого симметрирования обеих ее половин и поддержания этой симметрии в процессе работы. Это затрудняет эксплуатацию устройств при нарушении симметрии, приводит к появлению дополнительных погрешностей измерения.

Другой разновидностью устройств с измерителем индукции в зазоре магнитной системы является устройство Института электродинамики АН УССР с коррекцией потока размагничивающих катушек [44]. В нем для измерения индукции используется преобразователь Холла, установленный в зазоре полюсных наконечников. Пропорциональность между выходным напряжением этого преобразователя и намагниченностью испытуемого образца обеспечивается с помощью коррекции, заключающейся в том, что в выходную цепь преобразователя вводится сигнал, пропорциональный потоку размагничивающих катушек. Для получения этого сигнала используется дополнительный корректирующий преобразователь Холла, включенный последовательно с основным и расположенный в нейтральной плоскости образца так, чтобы он реагировал на напряженность размагничивающего поля. В отсутствие образца сигналы обоих преобразователей должны взаимно уравновешиваться.

Недостаток такого устройства — зависимость коррекции от длины и сечения испытуемого образца и связанная с

этим необходимость ее перестройки при измерении образцов различной длины. Расположение измерителя индукции в торце испытуемого образца [52] позволяет исключить необходимость внесения в результат измерений поправок, учитывающих сечение образца. Однако при использовании для измерения индукции катушек или полупроводниковых преобразователей Холла, установленных в углублении полюсного наконечника либо на его поверхности, появляется дополнительная погрешность измерения. В первом случае эта погрешность связана с перераспределением магнитного потока образца в месте расположения измерителя индукции за счет влияния немагнитного углубления в полюсном наконечнике, а во втором — обуславливается наличием между торцом образца и полюсным наконечником дополнительного воздушного зазора, необходимого для установки измерителя индукции.

Более перспективным является использование для измерения индукции в торце образца ферромагнитных преобразователей Холла, расположенных на поверхности полюсных наконечников. Применение таких преобразователей в устройстве, разработанном в Институте электродинамики АН УССР, позволило снизить немагнитные зазоры между торцом образца и полюсным наконечником до величин, не превышающих нескольких сотых долей миллиметра [33]. В этом случае дополнительная погрешность измерения индукции, возникающая за счет смещения измерителя с нейтрали в торец образца, для образцов обычных размеров не превышает 1%.

Существующая в настоящее время аппаратура для определения параметров материала при испытании постоянных магнитов обеспечивает непосредственное измерение коэрцитивной силы. В условиях производства для этого используются коэрцитиметры с разомкнутой или неполностью замкнутой магнитной системой [23, 44, 50]. Для определения остаточной индукции или остаточного потока широко применяется индукционно-импульсный метод измерения

с баллистическим гальванометром или веберметром в качестве измерительного прибора. Внешняя магнитная цепь образца при таких измерениях обычно полностью или частично замыкается магнитопроводом.

Имеющиеся автоматические устройства для контроля параметров постоянных магнитов предназначены для разбраковки значительных партий однотипных изделий. Эти устройства построены на использовании дифференциального метода измерения с одновременным сравнением потоков образцового и испытываемых постоянных магнитов или пропорциональных им электрических сигналов. Они позволяют осуществлять автоматический контроль двухполюсных постоянных магнитов простой или сложной формы в определенных точках или на определенных участках гистерезисного цикла.

В устройствах, разработанных Новочеркасским НИИ постоянных магнитов, применяются мостовые и двойные симметричные магнитные системы [25]. С помощью этих устройств можно измерять индукцию, напряженность магнитного поля и магнитную энергию постоянных магнитов простой формы. Существенным недостатком таких устройств является значительная сложность магнитной системы.

Устройства Новочеркасского политехнического института основаны на применении дифференциальных магнитных систем [1]. Эти системы конструктивно более просты и обеспечивают более высокую чувствительность по отношению к разности потоков образцового и испытываемого магнитов. Контроль постоянных магнитов в таких устройствах может осуществляться как по величинам остаточной индукции и коэрцитивной силы, так и по степени совпадения потоков контролируемого и образцового магнита на рабочем участке кривой размагничивания.

Во Владимирском политехническом институте разработано полуавтоматическое устройство для магнитной подготовки и разбраковки постоянных магнитов определенной формы [39]. Устройство основано на использовании индук-

ционно-непрерывного метода измерения и осуществляет контроль магнитов по остаточной индукции, коэрцитивной силе и рабочей индукции. Недостатком устройства является использование индукционно-непрерывного метода измерения, что значительно затрудняет возможность контроля магнитов других типоразмеров и тем самым ограничивает возможности устройства.

Г л а в а II

ВЗАИМОСВЯЗЬ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

1. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ В УСТРОЙСТВАХ С ЗАМКНУТОЙ И РАЗОМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Основной способ определения характеристик образцов из магнитотвердых материалов — это испытания их в устройствах с замкнутой магнитной системой. Измерение индукции или намагниченности при этом производится с помощью обмотки, охватывающей нейтральное сечение образца, а напряженности поля — измерителем, расположенным на поверхности образца в нейтральной плоскости.

Во всех тех случаях, когда индукция (намагниченность) измеряется измерителями, установленными в торцевом сечении образца или в зазоре магнитной системы, последняя оказывается разомкнутой в большей или меньшей степени. Это обстоятельство приводит к тому, что полученные таким образом кривые могут не соответствовать действительным кривым размагничивания материала. Наиболее сильно такое расхождение измеренных и действительных характеристик проявляется в тех случаях, когда измерения проводятся на образцах в разомкнутой магнитной системе. В соответствии с теорией, изложенной в работах [15, 31]

для этого случая можно показать, что при указанном способе расположения измерителей магнитные характеристики, снятые для образцов, обеспечивающих однородность намагниченности (образцы в форме эллипсоидов вращения), будут соответствовать характеристикам, определенным в замкнутой магнитной системе. Если форма образца не обеспечивает его однородной намагниченности, невозможно показать теоретически тождественность характеристик, определенных для замкнутых и разомкнутых образцов. В связи с этим задача сравнения таких характеристик решалась на основании анализа экспериментально полученных данных.

С учетом того, что магнитные свойства материала наиболее полно характеризуются его намагниченностью, при анализе сравнивались зависимости именно этой величины от напряженности размагничивающего поля. Кроме того, определялась степень влияния на тождественность указанных характеристик относительных размеров испытуемых образцов, а также места расположения измерителей при определении характеристик разомкнутых образцов.

Измерения в замкнутой системе проводились в пермеамetre сильных полей установки БУ-3, а разомкнутых образцов — в соленоиде этой установки. Намагничивание образцов в последнем случае также проводилось в пермеамetre сильных полей. Измерение намагниченности и напряженности поля на поверхности магнита при измерениях в разомкнутой системе выполнялось с помощью дифференциальной измерительной катушки. Ее геометрические размеры обеспечивали измерение напряженности поля на расстоянии не более 1,5 мм от поверхности образца и позволяли определять указанные величины в различных сечениях по длине испытуемого магнита.

Исследования проводились на образцах прямоугольной формы из сплава ЮН14ДК24Т2, для которого влияние магнитной вязкости при измерениях в разомкнутой системе [10] проявляется в малой степени. Для исключения погрешностей, связанных с неоднородностью свойств материала, образцы, подготовленные для исследования, отбирались на основании внешнего осмотра (отсутствие трещин, раковин, сколов), рентгеновского анализа (отсутствие внутренних пустот, трещин, включений) и предварительного определения характера изменения остаточной намагниченности по длине разомкнутого образца.

Кроме того, была принята методика проведения измерений, при которой образцы с различной относительной длиной получались путем постепенного уменьшения длины исходного образца. Для каждого раз-

мера производился цикл измерений, включающий в себя измерения в замкнутой и разомкнутой магнитных системах. Исходный образец разрезался таким образом, чтобы нейтральное сечение для всех последующих образцов сохранялось неизменным, т. е. симметрично отрезались концы предыдущего образца. Такая методика обеспечивала получение образцов различной длины со строго идентичными магнитными свойствами и позволяла сравнивать результаты измерений, проведенных для этих образцов в разомкнутой магнитной системе, между собой и по отношению к характеристике материала. Чтобы получить более достоверные данные, в качестве такой характеристики принималась кривая размагничивания, усредненная по результатам измерений, проведенных в замкнутой магнитной системе для образцов с различной длиной.

В качестве исходных были выбраны образцы длиной 105 мм, сечением $23 \times 23 \text{ мм}^2$. Последующие измерения проводились для образцов длиной 50 и 20 мм, что соответствует изменению относительной длины от 4,57 до 0,87 и довольно полно перекрывает диапазон относительных размеров обычно испытываемых образцов.

Связь между индукцией $B_{\text{ист}}$, намагниченностью $J_{\text{ист}}$ и напряженностью внешнего поля $H_{\text{вн}}$ для разомкнутого образца определяется известным выражением

$$B_{\text{ист}} = \mu_0 [J_{\text{ист}}(1 - N) + H_{\text{вн}}], \quad (1)$$

где N — коэффициент размагничивания; μ_0 — магнитная постоянная.

При принятой методике в процессе измерений находились значения составляющей $B_{J_{\text{изм}}}$ и напряженности собственного размагничивающего поля образца $H'_{\text{изм}}$ в соответствии с выражениями

$$B_{J_{\text{изм}}} = \mu_0 J_{\text{ист}}(1 - N) = k_B \alpha_B;$$

$$H'_{\text{изм}} = -N J_{\text{ист}} = k_H \alpha_H,$$

где α_B и α_H — отклонения указателя баллистического гальванометра при измерении намагниченности и напряженности поля; k_B и k_H — соответствующие постоянные.

Исходя из выражения (1), величины составляющей $B_{J_{\text{ист}}} = \mu_0 J_{\text{ист}}$ и напряженности поля, определяемой измерителем на поверхности образца $H_{\text{изм}}$, могут быть найдены

$$B_{J_{\text{ист}}} = B_{J_{\text{изм}}} - \mu_0 H'_{\text{изм}};$$

$$H_{\text{изм}} = H_{\text{вн}} + H'_{\text{изм}}.$$

Результаты проведенных измерений и вычислений графически показаны на рис. 1. На рисунке изображена кривая размагничивания материала 1, снятая в замкнутой магнитной системе. Показаны кривые, характеризующие изменение остаточной намагниченности и напряженности собственного размагничивающего поля, измеренные, в соответствии с изложенной выше методикой, для различных сечений по длине (от нейтрали к концам магнита) разомкнутых образцов длиной 105, 50 и 20 мм (кривые 2, 3, 4), а также изменение магнитных свойств для нейтрального (соответствующие пунктирные кривые) и концевого (штрихпунктирные кривые) сечений указанных образцов в процессе их размагничивания.

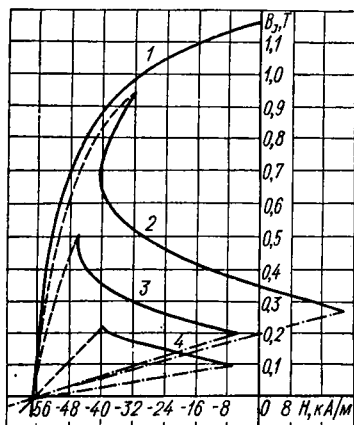


Рис. 1. Кривые размагничивания, построенные для замкнутых и разомкнутых образцов с различной относительной длиной.

Как видно из графиков, магнитные свойства образцов, измеренные в разомкнутой магнитной системе с помощью измерителей, фиксирующих поток в магните и напряженность поля на его поверхности, не соответствуют точкам кривой размагничивания материала. В зависимости от соотношения геометрических размеров образца магнитные свойства могут характеризоваться на плоскости $B_J - H$ точками, значительно отстоящими от точек кривой размаг-

ничивания, а изменения их в процессе размагничивания образца — кривыми, не соответствующими кривой размагничивания материала.

Характерная особенность этих кривых — снижение (и даже изменение знака для образца с большой относительной длиной) измеренного значения напряженности поля при смещении измерителя с нейтрали к концам магнита. Кроме того, пересечение кривых размагничивания, определенных для концевых сечений магнитов, с осью абсцисс происходит при напряженностях поля, меньших значения коэрцитивной силы материала. Так как величина этого снижения в зависимости от относительной длины образцов составляет 2—5%, его нельзя отнести за счет погрешности измерения и следует рассматривать как результат неоднородной намагниченности образцов при измерении их свойств в устройствах с разомкнутой магнитной системой.

Проведенные измерения показывают, что при анализе характеристик образцов, геометрические формы которых не обеспечивают их однородной намагниченности, в расчетное выражение, определяющее величину измеренной напряженности поля $H'_{\text{изм}}$, должна быть внесена поправка на неоднородную намагниченность образца. С учетом этой поправки, значения измеренной напряженности и составляющей $B_{J_{\text{ист}}}$ могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} H'_{\text{изм}} &= -NJ_{\text{ист}} + \Delta H; \\ B_{J_{\text{ист}}} &= B_{J_{\text{изм}}} - \mu_0 (H'_{\text{изм}} - \Delta H), \end{aligned} \quad (2)$$

где ΔH — поправка, учитывающая различие между истинным и измеренным значениями напряженности поля, обусловленное неоднородной намагниченностью образца.

Внесение указанной поправки позволяет также записать исходное выражение (1) в виде

$$B_{\text{ист}} = B_{J_{\text{ист}}} + \mu_0 (H_{\text{изм}} - \Delta H). \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) устанавливают связь между истинным и измеренным значениями индукции, намагниченности и напряженности поля при неоднородной намагниченности образцов и являются расчетными при определении истинных значений этих величин по результатам измерений, проведенных в устройствах с разомкнутой магнитной системой.

2. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ РАЗМАГНИЧИВАЮЩЕГО ПОЛЯ НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ В УСТРОЙСТВАХ С РАЗОМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Рассмотрим влияние способа определения напряженности размагничивающего поля на погрешность измерения коэрцитивной силы магнитотвердых материалов в устройствах с разомкнутой магнитной системой. При таких измерениях напряженность размагничивающего поля определяется обычно по току питания размагничивающего устройства, т. е. находится напряженность внешнего размагничивающего поля. Истинное значение коэрцитивной силы в этих условиях может быть получено при измерениях по намагниченности на образцах, форма которых обеспечивает ее однородность. Если последнее условие не выполняется, возникает дополнительная погрешность измерения, величина которой возрастает с уменьшением относительной длины магнита. При определении коэрцитивной силы по индукции [31], даже для образцов в форме эллипсоидов вращения, измеренное значение должно быть заниженным по сравнению с истинной величиной коэрцитивной силы. Это снижение пропорционально коэффициенту размагничивания образца и в зависимости от соотношения его геометрических размеров может достигать нескольких десятков процентов.

Указанная погрешность должна исключаться при условии, что напряженность размагничивающего поля определяется измерителем, расположенным на поверхности образца, так как предполагается, что в этом случае будет определена напряженность истинного размагничивающего поля. Результаты экспериментов показывают, что для образцов неэллипсоидальной формы это предположение в полной мере не выполняется. В связи с этим, следует ожидать, что даже при измерении напряженности поля на поверхности образца результат измерений может содержать погрешность, обусловленную влиянием его конечных размеров.

Полученные данные позволяют сравнить величину коэрцитивной силы по намагниченности H_{c_j} и по индукции H_{c_B} , измеренную при расположении измерителей в различных сечениях по длине образца, с истинным ее значением $H_{c_{j_{ист}}}$ или $H_{c_{B_{ист}}}$, полученным при испытаниях в замкнутой магнитной системе. На графиках рис. 2 показаны относительные изменения измеренных на образцах значений коэрцитивной силы по намагниченности $H_{c_j}/H_{c_{j_{ист}}}$ и по индукции $H_{c_B}/H_{c_{B_{ист}}}$ при разных способах определения напряженности размагничивающего поля.

График рис. 2, а соответствует измерению напряженности внешнего размагничивающего поля, б — напряженности поля на поверхности образца в плоскости, соответствующей тому сечению, в котором производится определение намагниченности или индукции, в — напряженности поля на поверхности образца в плоскости его нейтрального сечения. Кривые 1, 2 и 3 характеризуют изменения коэрцитивной силы по длине для магнитов длиной 105, 50 и 20 мм (относительная длина 4,57; 2,18 и 0,87) соответственно. На графиках видно (рис. 2, а) снижение измеренного значения коэрцитивной силы по сравнению с ее истинной величиной. Это снижение проявляется в меньшей степени при

расположении измерителей потока в нейтрали испытуемых образцов и в зависимости от их относительной длины составляет 1—2% при определении коэрцитивной силы по намагниченности и 6—31% — по индукции.

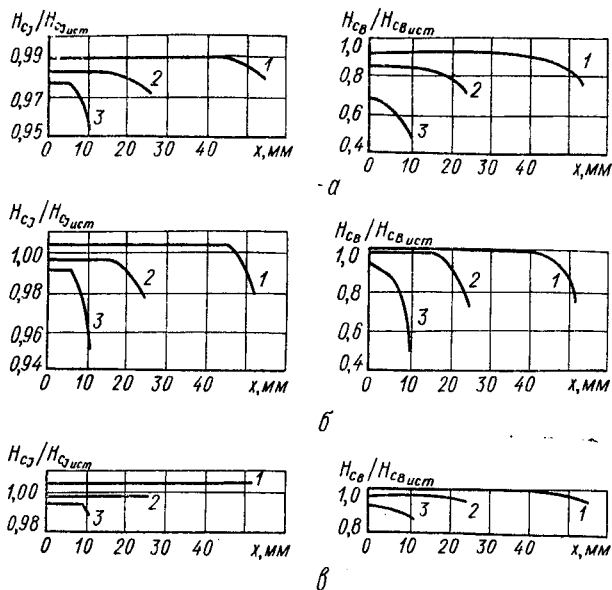


Рис. 2. Графики зависимости погрешностей измерения коэрцитивной силы разомкнутых образцов от способа определения напряженности размагничивающего поля.

При измерении напряженности поля на поверхности образца с помощью измерителей, расположенных в его нейтрали, отличие полученного значения коэрцитивной силы по намагниченности от истинного не превышает 0,8% и доходит до 8% при измерениях по индукции. Смещение измерителей с нейтрали магнитов приводит к значительному увеличению погрешности измерения. Сравнение кривых,

приведенных на графиках рис. 2, б и в, показывает, что смещение измерителя потока к концам магнита в меньшей степени влияет на погрешность измерения коэрцитивной силы, если измеритель напряженности поля при этом находится в нейтральной плоскости образца, а не смещается одновременно с ним.

Таким образом, при определении коэрцитивной силы в разомкнутой магнитной системе на образцах неэллипсоидальной формы напряженность размагничивающего поля должна определяться с помощью измерителя, расположенного на поверхности образца в плоскости его нейтрального сечения. Этот способ измерения напряженности по сравнению с ее определением по току питания размагничивающего устройства обеспечивает при испытаниях высококоэрцитивных материалов значительное снижение погрешности, обусловленной влиянием геометрических размеров образца. В рассмотренном случае погрешность измерения снижалась за счет этого примерно в два раза при измерениях по намагниченности и в четыре — по индукции.

Для образцов с малой относительной длиной указанная погрешность таким способом измерения полностью не исключается. Последнее связано с тем, что напряженность поля, измеренная на поверхности образца, в результате его неоднородной намагниченности и конечных размеров измерителя не соответствует полностью истинной напряженности поля в образце.

3. АНАЛИТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕЖДУ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫМИ В УСТРОЙСТВАХ С ЗАМКНУТОЙ И НЕПОЛНОСТЬЮ ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

При измерении магнитных характеристик на разомкнутых образцах с помощью измерителей, фиксирующих поток в нейтральном или концевом сечении образца и напряжен-

ность поля на его поверхности в плоскости нейтрального сечения, полученные кривые, как указывалось выше, не соответствуют кривым размагничивания материала. Используя эти результаты, а также основные положения работы [31], взаимную связь кривых размагничивания, определенных в замкнутой и незамкнутой магнитных системах, можно представить графически (рис. 3) [3].

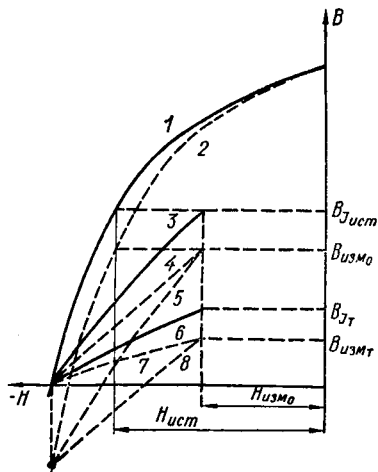


Рис. 3. Кривые размагничивания, определяемые в замкнутой и незамкнутой магнитных системах.

мерителя напряженности поля, расположенного в плоскости его нейтрального сечения, $B_{J_{измт}} = f(H_{изм0})$ и $B_{измт} = f(H_{изм0})$. Кривые 3, 6 представляют собой зависимости намагниченности в нейтральном и торцевом сечениях образца от напряженности поля, измеренной в его нейтральной плоскости, $B_{J_{ист}} = f(H_{изм0})$ и $B_{J_{т}} = f(H_{изм0})$. При выполнении графиков было принято, что величина индукции, измеренная в нейтральном сечении ра-

На этих графиках кривые 1 и 2 соответствуют кривым размагничивания материала по намагниченности $B_{J_{ист}} = f(H_{ист})$ и по индукции $B_{ист} = f(H_{ист})$; 4, 5 — кривые размагничивания, определенные на разомкнутых образцах с помощью измерителей, фиксирующих поток и напряженность поля в нейтрали магнита, $B_{J_{изм0}} = f(H_{изм0})$ и $B_{изм0} = f(H_{изм0})$; кривые 7, 8 — кривые размагничивания, определенные на разомкнутых образцах с помощью измерителя потока, установленного в торце образца, и измерителя напряженности поля, расположенного в плоскости его нейтрального сечения, $B_{J_{измт}} = f(H_{изм0})$ и $B_{измт} = f(H_{изм0})$. Кривые 3, 6 представляют собой зависимости намагниченности в нейтральном и торцевом сечениях образца от напряженности поля, измеренной в его нейтральной плоскости, $B_{J_{ист}} = f(H_{изм0})$ и $B_{J_{т}} = f(H_{изм0})$. При выполнении графиков было принято, что величина индукции, измеренная в нейтральном сечении ра-

замкнутого образца, равна действительному значению индукции, т. е. $B_{\text{изм}_0} = B_{\text{ист}}$, а величины намагниченности и напряженности поля, определяемые в нейтральном сечении, отличаются от соответствующих величин, измеренных в замкнутой магнитной системе.

От измеренного значения намагниченности можно перейти к истинному на основании выражения (1). При условии, что в процессе измерения намагниченности осуществляется компенсация потока намагничивающих катушек, т. е. выполняется условие $B_{J_{\text{изм}_0}} = B_{J_{\text{ист}}} (1 - N)$, запишем

$$B_{J_{\text{ист}}} = k_1 B_{J_{\text{изм}_0}}, \quad (4)$$

где k_1 — коэффициент, определяемый соотношением геометрических размеров образца и длиной воздушного зазора.

Напряженность поля отличается от ее истинного значения на величину ΔH , которую на основании выражения (2) можно считать пропорциональной намагниченности и представить следующим образом:

$$\Delta H = k_2 J_{\text{изм}_0}, \quad (5)$$

где k_2 — коэффициент, зависящий от соотношения размеров образца, длины воздушного зазора и расстояния от поверхности образца до измерителя напряженности поля.

Используя принятые допущения, можно рассмотреть четыре основных случая определения характеристик на незамкнутых образцах и записать выражения, устанавливающие связь измеренных и истинных значений магнитных величин.

1. Если измеряется намагниченность и величина ее определяется в нейтральном сечении образца, т. е. в результате измерения находится зависимость $J_{\text{изм}_0} = f(H_{\text{изм}_0})$, можно записать

$$\begin{aligned} J_{\text{ист}} &= k_1 J_{\text{изм}_0}; \\ H_{\text{ист}} &= H_{\text{изм}_0} - k_2 J_{\text{изм}_0}. \end{aligned} \quad (6)$$

2. При измерении по намагниченности и определении ее величины с помощью измерителя, расположенного в торце образца или смещенного с нейтрали магнита, когда в результате измерения определяется зависимость $J_{\text{изм}_T} = f(H_{\text{изм}_0})$, получаем

$$\begin{aligned} J_{\text{ист}} &= k_1 k_1' J_{\text{изм}_T}; \\ H_{\text{ист}} &= H_{\text{изм}_0} - k_1' k_2 J_{\text{изм}_T}, \end{aligned} \quad (7)$$

где k_1' — коэффициент, учитывающий снижение потока в месте измерения по сравнению с потоком в нейтральном сечении.

3. При измерении по индукции и определении ее величины в нейтральном сечении образца, т. е. при непосредственном получении характеристики $B_{\text{изм}_0} = f(H_{\text{изм}_0})$, находим

$$\begin{aligned} B_{\text{ист}} &= B_{\text{изм}_0}; \\ H_{\text{ист}} &= \frac{\mu_0 k_1 H_{\text{изм}_0} - k_2 B_{\text{изм}_0}}{\mu_0 (k_1 - k_2)}. \end{aligned} \quad (8)$$

4. При измерении по индукции с помощью измерителя в торце магнита, т. е. по кривой $B_{\text{изм}_T} = f(H_{\text{изм}_0})$, получим

$$\begin{aligned} B_{\text{ист}} &= k_1' (k_1 - k_2) (B_{\text{изм}_T} - \mu_0 H_{\text{вн}_T}) + \mu_0 H_{\text{изм}_0}; \\ H_{\text{ист}} &= H_{\text{изм}_0} - k_1' k_2 (B_{\text{изм}_T} - \mu_0 H_{\text{вн}_T}) / \mu_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где $H_{\text{вн}_T}$ — напряженность внешнего размагничивающего поля, измеренная в месте расположения измерителя потока.

Как видно из приведенных соотношений, во всех рассмотренных случаях в результате измерений необходимо вводить поправку, определяемую коэффициентами k_1 , k_1' и k_2 .

4. ЗАВИСИМОСТЬ ПОПРАВОЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПЫТУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ И МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

При определении зависимости поправочных коэффициентов от геометрических параметров испытуемых образцов и магнитной системы было принято, что величина коэффициентов k_1 , k_1' и k_2 при прочих равных условиях (размеры

Таблица 1

Номер образца	Марка сплавов	B_r , Т	H_{cB} , кА/м	l , мм	S , см ²	l/\sqrt{S}
1	ЮНД4	0,644	38,5	49,5	5,88	2,04
2	ЮНД4	0,622	38,9	31,0	5,85	1,28
3	ЮН14ДК24Т2	1,13	47,6	30,0	1,87	2,19
4	ЮНДК18	0,830	53,8	49,0	1,81	3,63

образца, длина воздушного зазора и расстояние до измерителя поля) остается постоянной для различных точек кривой размагничивания. Такое допущение позволяет определить искомые коэффициенты для одной точки кривой размагничивания, а именно при нулевом значении напряженности внешнего размагничивающего поля. Для этого случая справедливы соотношения:

$$\begin{aligned}
 k_1 &= (B_{изм_0} - \mu_0 H_{ист}) / B_{изм_0}; \\
 k_1' &= B_{изм_0} / B_{изм_T}; \\
 k_2 &= [\mu_0 (H_{изм_0} - H_{ист})] / B_{изм_0}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Для экспериментального исследования было выбрано четыре образца прямоугольного сечения с разным характером кривых размагничивания и различным соотношением геометрических размеров (табл. 1). Измерения проводились в пермеамetre сильных полей установки БУ-3. Симметричные воздушные зазоры δ между торцами образцов

и полюсными наконечниками создавались с помощью немагнитных прокладок, величина которых изменялась в пределах от 0,5 до 3,5 мм. Значения индукции $B_{изм_0}$ определялись с помощью измерительной обмотки в нейтральном сечении образцов, а индукции $B_{изм_т}$ — с помощью плоской измерительной обмотки, расположенной на поверхности немагнитной прокладки в торцевой плоскости образца.

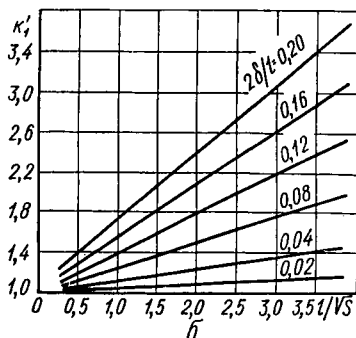
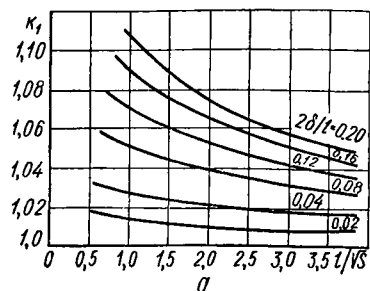


Рис. 4. Графики зависимости коэффициентов k_1 (а) и k_1' (б) от относительной длины магнитов при $2\delta/l \leq 0,2$.

принималось ее значение, определенное по величине индукции $B_{изм_0}$ и кривой размагничивания материала, снятой в замкнутой магнитной системе. Значения напряженности поля $H_{изм_0}$ на поверхности разомкнутых образцов определялись при расстоянии h центра измерителя от поверхности образца, равном 1,25 и 2,25 мм.

За истинную величину напряженности поля $H_{ист}$

напряженности поля $H_{ист}$

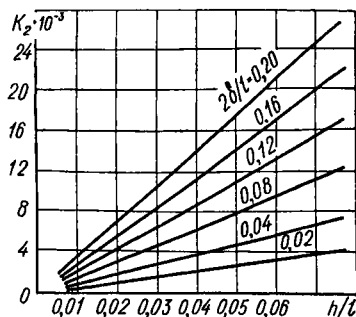


Рис. 5. График зависимости поправочного коэффициента k_2 от относительного удаления измерителя поля при $2\delta/l \leq 0,2$.

Результаты проведенных измерений и расчетов представлены в виде графиков на рис. 4 и 5. На этих графиках коэффициенты k_1 и k_1' даны в зависимости от относительной длины магнита l/\sqrt{S} , а коэффициент k_2 — в зависимости от относительного удаления измерителя поля h/l , где h — расстояние между центром измерителя и поверхностью образца. Каждая из приведенных характеристик соответствует определенному значению относительной длины зазора $2\delta/l$, где δ — длина воздушного зазора между торцом образца и полюсным наконечником. Семейства характеристик получены для различных значений относительной длины зазора в интервале их изменения от 0,02 до 0,2.

С целью экспериментальной проверки принятых выше допущений для одного из исследованных образцов (образец № 3) при длине воздушного зазора $\delta = 3$ мм и удалении измерителя $h = 1$ мм были сняты зависимости $B_{изм_0} = f(H_{изм_0})$ и $B_{изм_т} = f(H_{изм_т})$. На основании этих зависимостей, полученных расчетных выражений (8), (9) и графиков рис. 4 и 5 определены характеристики материала $B'_{изм_0} = f(H'_{ист})$ и $B''_{ист} = f(H''_{ист})$.

Результаты сравнения полученных кривых с действительной характеристикой материала показаны графически (рис. 6). Кривая 1 представляет собой кривую размагничи-

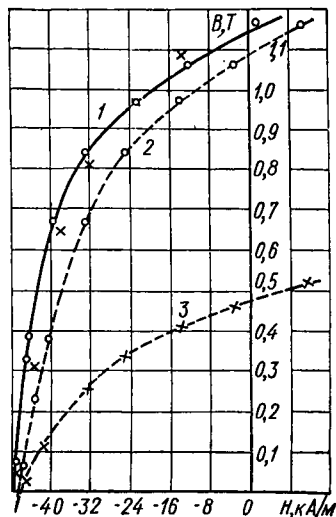


Рис. 6. Кривые размагничивания, построенные для замкнутой и неполностью замкнутой магнитных систем.

вания $B_{\text{ист}} = f(H_{\text{ист}})$, снятую при испытании образца № 3 в замкнутой магнитной системе, кривая 2 характеризует зависимость $B_{\text{изм}_0} = f(H_{\text{изм}_0})$, кривая 3 — зависимость $B_{\text{изм}_T} = f(H_{\text{изм}_0})$. Точки, нанесенные на кривой 1 кружочками и крестиками, дают представление о совпадении полученных характеристик $B'_{\text{изм}_0} = f(H'_{\text{ист}})$ и $B''_{\text{ист}} = f(H''_{\text{ист}})$ соответственно с действительной кривой размагничивания материала.

При оценке степени совпадения этих кривых использована методика, рекомендованная стандартом [29] на испытание образцов из магнитотвердых материалов. Через точки сравниваемой кривой проводятся лучи из начала координат. Полученные в этих точках значения индукции и напряженности поля сравниваются со значениями этих величин в точках пересечения проведенных лучей с действительной характеристикой материала. Анализ кривых рис. 6 показывает, что расхождение характеристик, полученных при испытании частично разомкнутых образцов, с действительной характеристикой материала не превышает 2% и находится в пределах погрешностей измерения. Это подтверждает правомочность сделанных исходных допущений и позволяет рекомендовать полученные расчетные выражения и установленные зависимости поправочных коэффициентов для определения действительных характеристик магнитотвердых материалов по результатам испытания образцов в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой.

Из приведенных выше расчетных выражений следует, что при определении характеристик материала в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой существенную погрешность в результаты измерения может внести несоответствие между измеренной и действительной величинами напряженности размагничивающего поля. Графики на рис. 5 показывают, что степень этого несоответствия, определяемая величиной поправочного коэффициента k_2 ,

в значительной мере зависит от расстояния между измерителем напряженности поля и поверхностью образца. Отсюда следует, что при создании подобных устройств необходимо использовать малогабаритные измерители поля и принимать меры для снижения этого расстояния.

Рассмотрим дифференциальные измерители, основанные на использовании двух индикаторов поля, установленных на различном расстоянии от поверхности образца. Определим истинное значение напряженности поля при использовании таких измерителей. Из выражения (6) можно записать

$$H_{\text{ист}} - H_{\text{изм}_1} = -k_{21}J_{\text{изм}_0};$$

$$H_{\text{ист}} - H_{\text{изм}_2} = -k_{22}J_{\text{изм}_0},$$

где $H_{\text{изм}_1}$ и $H_{\text{изм}_2}$ — значения напряженности поля, измеренные на расстоянии h_1 и h_2 от поверхности образца; k_{21} и k_{22} — соответствующие этим расстояниям значения коэффициента k_2 .

Решая приведенные уравнения совместно относительно $H_{\text{ист}}$, получаем

$$H_{\text{ист}} = \frac{k_{22}H_{\text{изм}_1} - k_{21}H_{\text{изм}_2}}{k_{22} - k_{21}}.$$

При малых значениях относительной длины воздушных зазоров ($2\delta/l \leq 0,2$), как следует из графиков, изображенных на рис. 5, коэффициент k_2 линейно связан с относительным удалением измерителя напряженности поля. Это позволяет преобразовать полученное выражение к виду

$$H_{\text{ист}} = \frac{l}{h_2 - h_1} (h_2 H_{\text{изм}_1} - h_1 H_{\text{изм}_2}). \quad (11)$$

При практическом использовании подобных измерителей целесообразнее выполнять условие $h_2 = 2h_1$, тогда выражение (11) несколько упрощается:

$$H_{\text{ист}} = 2H_{\text{изм}_1} - H_{\text{изм}_2},$$

что позволяет градуировать выходной прибор измерителя непосредственно в значениях истинной напряженности поля.

При определении параметров материала в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой измерения проводятся обычно при постоянном значении воздушного зазора. При испытаниях магнитов различной длины относительная величина воздушного зазора может существенно превышать значения, при которых получены зависимости для определения поправочных коэффициентов.

Учитывая это, экспериментально были определены поправочные коэффициенты при значительных ($2\delta/l > 1$) относительных величинах воздушного зазора. Эти измерения выполнялись в соответствии с описанной выше методикой в магнитной системе с постоянным воздушным зазором 120 мм. Испытуемые образцы располагались симметрично относительно полюсов системы; напряженность поля измеряли с помощью преобразователя Холла, установленного на поверхности образца в плоскости его нейтрального сечения, а намагниченность — преобразователем, расположенным у торца образца в плоскости, параллельной осевой линии зазора.

При таком расположении преобразователей показание измерителя намагниченности пропорционально составляющей H_J напряженности поля, создаваемого намагниченностью испытуемого образца. Величина этой составляющей пропорциональна потоку намагниченности, проходящему через торцевое сечение магнита. В связи с этим, можно записать

$$H_J = k'_J J_{\text{изм.т}}, \quad (12)$$

где k'_J — коэффициент, зависящий от геометрических размеров магнита и положения относительно его преобразователя намагниченности.

Измерения проводились на образцах с различным соотношением геометрических размеров, основные параметры

которых приведены в табл. 2. Значения поправочных коэффициентов определялись на основании выражений (10) с учетом выражения (12). Результаты проведенных измерений и расчетов показаны графически (рис. 7 и 8).

Значения коэффициентов k_1 и k_1'/k'_J на графике рис. 7, а даны в зависимости от относительной длины магнитов. Так как величина коэффициента k'_J зависит от положения пре-

Таблица 2

Номер образца	Марка сплавов	B_r , Т	$H_{cB'}$ КА/М	l , мм	S , см ²	l/\sqrt{S}
1	ЮН14ДК24	1,22	50,4	50	5,63	2,11
2	ЮН14ДК24Т2	1,11	56,0	30	5,75	1,25
3	ЮН14ДК24Т2	1,17	56,3	20	5,30	0,87
4	ЮН14ДК24	1,17	45,0	50	1,86	3,65
5	ЮН14ДК24	1,13	47,6	30	1,87	2,19
6	ЮНД4	0,56	38,5	20	1,69	1,54
7	ЮНД4	0,56	38,5	30	18,4	0,70
8	ЮНД4	0,56	38,5	20	18,4	0,47

образователя намагниченности относительно магнита, на рис. 7, б показаны зависимости относительного изменения коэффициента k'_J от смещения преобразователя намагниченности Δh в вертикальном направлении. Под величиной k'_J , здесь понимается значение коэффициента k'_J при нулевом смещении измерителя намагниченности. Кривая $k'_J/k'_J = f(\Delta h)$, изображенная на графике сплошной линией, представляет собой усредненные значения этой зависимости, а пунктирные кривые — отклонения от этой кривой результатов измерений, проведенных для образцов с различной относительной длиной.

Значения коэффициентов k_2 , приведенные на рис. 8, даны в зависимости от геометрического параметра l/\sqrt{a} , учитывающего относительные размеры образцов, и удаления

h центра преобразователя напряженности поля от поверхности магнита. Эти графики отличаются от аналогичных зависимостей, снятых при малых значениях относительной длины воздушных зазоров (см. рис. 5), тем, что

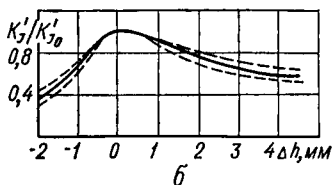
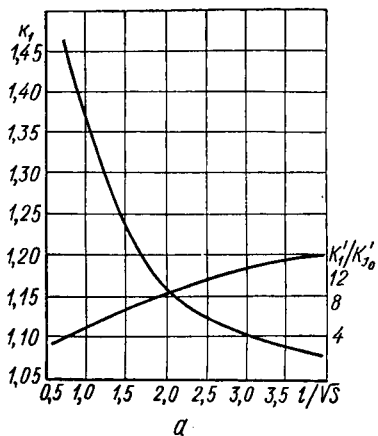


Рис. 7. Графики зависимости поправочных коэффициентов k_1 , k_1'/k'_{j_0} от относительной длины магнитов (а) и отношения k'_j/k'_{j_0} от смещения преобразователя намагниченности (б) при $2\delta/l > 1$.

при $h = 0$ коэффициенты $k_2 \neq 0$. Это свидетельствует о том, что при больших значениях воздушных зазоров различие между истинным и измеренным на поверхности образца значением напряженности поля не может быть полностью све-

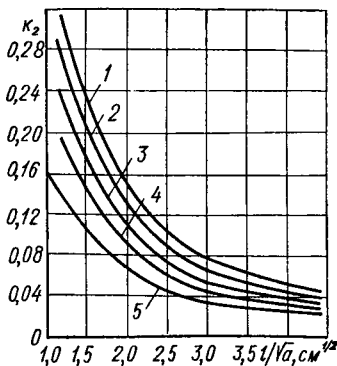


Рис. 8. Кривые зависимости поправочного коэффициента k_2 от относительных размеров магнитов и удаления измерителя поля при $2\delta/l > 1$:

1 — $h = 6$ мм; 2 — 4,5 мм; 3 — 3 мм; 4 — 1,5 мм; 5 — $h = 0$.

дено к нулю за счет приближения измерителя поля к поверхности магнита или использования дифференциальных измерителей. Оставшаяся в этом случае нескомпенсированная разность между истинной и измеренной напряженнос-

тью поля определяется неоднородностью намагниченности и может быть учтена только введением коррекции, связанной с величиной намагниченности.

Г л а в а III

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

1. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА В УСТРОЙСТВАХ С НЕПОЛНОСТЬЮ ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

При определении параметров магнитотвердых материалов в производственных условиях целесообразно использовать устройства с неполностью замкнутой магнитной системой. Наличие постоянного воздушного зазора и бескоммутационный метод измерения обеспечивают в этих устройствах высокую производительность и удобство автоматизации измерительных операций. Вместе с тем незамкнутость магнитной системы может вызывать дополнительные погрешности измерения. Рассмотрим методы построения таких устройств, обеспечивающие снижение этих погрешностей.

В настоящее время устройства с неполностью замкнутой магнитной системой широко применяются при измерении коэрцитивной силы постоянных магнитов по намагниченности. При этом контроль магнитного состояния испытуемого магнита выполняется с помощью двух преобразователей Холла. Один из них, расположенный на поверхности образца в плоскости его нейтрального сечения, измеряет напряженность размагничивающего поля, а второй, установленный у торца образца, реагирует на его намагниченность.

При таком расположении измерителей относительно испытуемого образца определяются характеристики $H_J = f(H_{\text{изм}_0})$, где H_J — составляющая напряженности поля, создаваемого намагниченностью испытуемого магнита, которая воздействует на преобразователь намагниченности; $H_{\text{изм}_0}$ — значение напряженности поля, измеренной на поверхности образца в плоскости его нейтрального сечения.

Используя полученные выше соотношения (7) и (12), связь измеряемых и действительных величин, характеризующих магнитные свойства материала, для рассматриваемого случая можно представить выражениями

$$J_{\text{ист}} = \frac{k_1 k_1'}{k_J'} H_J; \quad (13)$$

$$H_{\text{ист}} = H_{\text{изм}_0} - \frac{k_1' k_2}{k_J'} H_J.$$

При измерении коэрцитивной силы абсолютное значение намагниченности не определяется, а фиксируется момент перехода ее через нуль, т. е. измеряется напряженность размагничивающего поля при условии $H_J = 0$. В связи с этим отпадает необходимость в определении коэффициентов k_1 , k_1' и k_J' , величина которых при измерениях влияет только на чувствительность измерителя намагниченности. Отпадает также необходимость в определении коэффициента k_2 , так как в момент измерения $H_J = 0$ и $H_{\text{изм}_0} = H_{\text{ист}} = H_{cJ}$.

Указанные обстоятельства значительно упрощают задачу измерения коэрцитивной силы по намагниченности и позволяют без дополнительной перестройки и калибровки схемы производить измерение широкой номенклатуры образцов. При построении измерительных устройств сигналы, снимаемые с преобразователей, в этом случае без промежуточной корректировки подаются непосредственно в измерительную схему. Структурная схема измерения коэрцитивной силы с использованием неполностью замкнутой

магнитной системы показана на рис. 9, где *МС* — неполностью замкнутая магнитная система, *ПМ* — испытуемый постоянный магнит, *ПН* и *ПЖ* — преобразователи напряженности поля и намагниченности, *ИС* — измерительная схема. Алгоритм измерения заключается в доведении предварительно намагниченного образца плавным увеличением размагничивающего поля до состояния, при котором его намагниченность достигает нулевого значения, и измерении в этот момент напряженности размагничивающего поля.

Основой для определения других параметров материала в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой является возможность измерения в них истинного значения индукции. Рассмотрим условия, при которых возможно выполнение таких измерений.

Используя известное соотношение, устанавливающее связь между индукцией, намагниченностью и напряженностью поля в материале $B_{\text{ист}} = \mu_0 (J_{\text{ист}} + H_{\text{ист}})$, и выражения (13), можно записать

$$B_{\text{ист}} = \mu_0 \left[\frac{k_1'}{k_J'} (k_1 - k_2) H_J + H_{\text{изм}_0} \right]. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что для определения истинного значения индукции в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой в выходной сигнал измерителя намагниченности необходимо вносить корректировку, величина которой зависит от соотношения геометрических размеров магнита и расположения относительно его

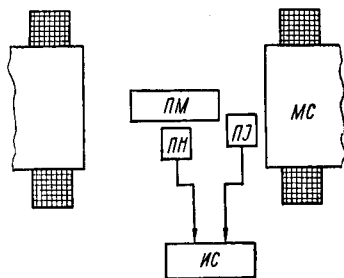


Рис. 9. Схема измерения коэрцитивной силы по намагниченности с использованием неполностью замкнутой магнитной системы.

преобразователей намагниченности и напряженности поля. Так как при широкой номенклатуре испытуемых образцов определение поправочных коэффициентов аналитическим путем затруднительно, необходима экспериментальная калибровка устройства. Такая калибровка может производиться по результатам измерения стандартных образцов,

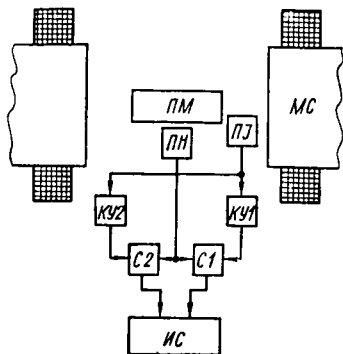


Рис. 10. Схема измерения коэрцитивной силы по индукции и остаточной индукции с использованием неполностью замкнутой магнитной системы.

параметры которых предварительно определены тем или иным способом.

Экспериментальную калибровку устройства возможно проводить либо в точке, соответствующей остаточной индукции материала, либо в точке с нулевым значением напряженности внешнего магнитного поля. Так как согласно выражению (13) в результате измерения напряженности поля также необходимо вносить корректировку, зависящую от геометрических размеров испытуемых образцов, определение состояния образца, при котором выполняется ус-

ловие $H_{\text{ист}} = 0$, в этом случае существенно затрудняется. Поэтому при построении измерительных устройств с внесением коррекции по каналам изменения индукции и напряженности поля согласно выражениям (13) и (14) должна обеспечиваться возможность отдельной калибровки этих каналов по стандартным образцам. Учитывая, что в устройстве используется незамкнутая магнитная система, такую калибровку целесообразно проводить по результатам измерения кажущейся остаточной индукции образца и напряженности его собственного размагничивающего поля, т. е. при условии $H_{\text{вн}} = 0$.

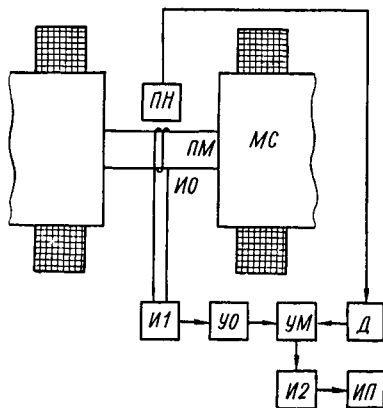
В тех случаях, когда значения индукции при $H_{\text{вн}} = 0$ и остаточной индукции значительно различаются (испытание магнитов с малой относительной длиной), калибровку устройства для повышения точности измерения возможно проводить в двух различных точках кривой размагничивания. Например, калибровку канала измерения напряженности поля при $H_{\text{вн}} = 0$, а канала измерения индукции — при $B_{\text{ист}} = B_r$.

Структурная схема построения корректирующих цепей устройства при таком способе измерения изображена на рис. 10, где $KУ1$ и $KУ2$ — корректирующие усилители в каналах измерения индукции и напряженности поля, $C1$ и $C2$ — сумматоры в соответствующих каналах измерения. Остаточная индукция измеряется в процессе плавного уменьшения внешнего подмагничивающего поля в момент, когда истинная напряженность поля магнита достигает нулевого значения, а коэрцитивная сила по индукции — описанным выше способом.

Рассмотренные структурные схемы измерительных и корректирующих цепей обеспечивают возможность измерения истинного значения индукции и напряженности поля в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой. Эти схемы позволяют измерять остаточную индукцию и коэрцитивную силу по индукции, а при введении умножителей, перемножающих сигналы индукции и напряженности поля, позволяют также измерять максимальную магнитную энергию. В сочетании с ручными и автоматическими системами уравнивания такие схемы являются основой при построении аналоговых и цифровых автоматических устройств для измерения параметров магнитотвердых материалов при испытании постоянных магнитов.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИИ ОБРАЗЦОВ

Наряду с измерением параметров материала при испытании постоянных магнитов в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой можно применять и другие методы нахождения этих величин. В частности, в ряде случаев возникает задача непосредственного определения параметров материала при периодическом перемагничивании испытуемых образцов в устройствах с замкнутой магнитной системой.



Существующие методы испытания магнитотвердых материалов не обеспечивают решения этой задачи. Поэтому рассмотрим принцип построения устройств, обеспечивающих определение параметров материала при периодическом перемагничивании образцов. При построении таких устройств

Рис. 11. Схема устройства для непосредственного определения коэрцитивной силы при периодическом перемагничивании образцов.

используется индукционно-непрерывный метод измерения индукции и напряженности поля либо могут применяться ферромагнитные и полупроводниковые преобразователи Холла.

Структурная схема, характеризующая принцип построения устройства, позволяющего непосредственно измерять коэрцитивную силу магнитотвердых материалов при периодическом перемагничивании образцов [14], показана на рис. 11. Испытуемый постоянный магнит ПМ размещен

в зазоре магнитной системы MC , питающейся от источника низкочастотного переменного тока. В качестве преобразователя магнитной индукции используется измерительная обмотка $ИО$, нанесенная на постоянный магнит, а напряженность поля определяется преобразователем Холла $ПН$.

Предположим, что напряженность перемангничивающего поля в зазоре магнитной системы изменяется по синусоидальному закону $H = H_m \sin \omega t$. Тогда напряжение, снимаемое с дифференциатора $Д$, включенного на выходе преобразователя $ПН$, определяется выражением $U_1 = = k_n k_d \omega H_m \cos \omega t$, где k_n и k_d — коэффициенты преобразования измерителя напряженности поля и дифференциатора.

Напряжение измерительной обмотки индукции интегрируется и ограничивается по уровню с помощью интегратора $И1$ и усилителя-ограничителя $УО$. Напряжение на выходе $УО$

$$U_2 = k_0 \frac{4B_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin [(2n-1)\omega t + \varphi_{2n-1}]}{2n-1},$$

где k_0 — коэффициент пропорциональности; B_0 — фиксированный уровень ограничения.

Сигналы U_1 и U_2 перемножаются умножителем $УМ$, в результате чего получаем

$$U_3 = k_n k_d k_0 k_y \frac{2B_0 H_m \omega}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \{ \sin [(2n-2)\omega t + \varphi_{2n-1}] + \sin [2n\omega t + \varphi_{2n-1}] \}.$$

После интегрирования этого выражения с помощью интегратора $И2$ имеем

$$U_4 = k \frac{2B_0 H_m \omega}{\pi} \int_0^T \left\{ \sin \varphi_1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\sin [(2n-2)\omega t + \varphi_{2n-1}]}{2n-1} + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin [2n\omega t + \varphi_{2n-1}]}{2n-1} \right\} dt = 4k B_0 H_m \sin \varphi_1,$$

где $k = k_n k_d, \dots, k_n$ — коэффициент преобразования измерительной схемы; k_y, k_n — коэффициенты преобразования умножителя и интегратора. Так как $H_{cB} = H_m \sin \varphi_1$, окончательно получаем

$$H_{cB} = U_4 / 4k B_0. \quad (15)$$

Оценка погрешности измерения коэрцитивной силы рассмотренным методом может быть произведена с помощью логарифмирования найденного уравнения преобразования (15) и последующего его дифференцирования. Полученная таким образом предельная относительная погрешность измерения определяется выражением

$$\delta H_{cB} = \delta U_4 + \delta B_0 + \delta k, \quad (16)$$

где δU_4 — относительная погрешность измерения выходного напряжения измерительным прибором *ИП*; δB_0 и δk — относительные погрешности определения уровня ограничения и коэффициента преобразования измерительной схемы.

Учитывая, что по каналу измерения индукции производится усиление и ограничение сигнала, снимаемого с преобразователя, и что уровень ограничения может поддерживаться с достаточно высокой точностью, указанная погрешность при практическом выполнении устройства в значительной мере будет определяться точностью измерения напряженности поля.

Рассмотренная схема позволяет также измерять остаточную индукцию. Для этого усилитель-ограничитель *УО* необходимо включить в цепь измерителя напряженности поля *ПН* между его выходом и умножителем *УМ*, а сигнал, снимаемый с измерительной обмотки индукции *ИО*, подать непосредственно на второй вход умножителя. Погрешность измерения в этом случае будет определяться в основном погрешностью измерения индукции.

Таким образом, без существенного усложнения одна и

та же схема может быть использована для определения двух основных параметров магнитотвердых материалов — коэрцитивной силы по индукции и остаточной индукции.

Аналогичный принцип построения измерительной схемы может быть положен в основу устройства [14] для измерения максимальной удельной магнитной энергии. Так

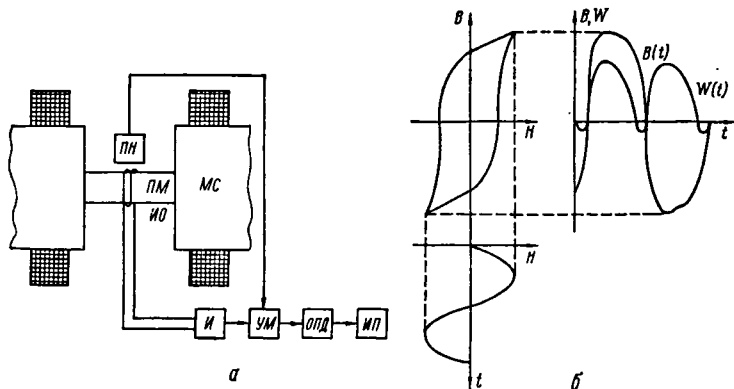


Рис. 12. Схема устройства для непосредственного определения максимальной удельной магнитной энергии при периодическом перемагничивании образцов (а) и графики, характеризующие принцип его работы (б).

же, как и в ранее рассмотренных, в этом устройстве (рис. 12, а) испытуемый постоянный магнит ПМ помещается в периодически изменяющееся магнитное поле, создаваемое магнитной системой МС. Сигнал, снимаемый с измерительной обмотки ИО, через интегратор И подается на вход умножителя УМ. На второй его вход с преобразователя ПН поступает сигнал, пропорциональный напряженности поля.

Графики, характеризующие изменение магнитной индукции $B = f(t)$ и напряженности поля $H = f(t)$ испытуемого образца, изображены на рис. 12, б. Для упрощения принято, что напряженность перемагничивающего поля

изменяется по синусоидальному закону. В этом случае кривая $B = f(t)$ будет несинусоидальна и сдвинута по фазе относительно кривой $H = f(t)$ на угол магнитного запаздывания. На этом же рисунке показана кривая $W = f(t)$, которая отражает изменение во времени выходного напряжения умножителя (пропорционального удельной магнитной энергии образца), и в пределах периода имеет четыре экстремума. Положительные соответствуют точке насыщения материала, а отрицательные — точке с максимальным значением удельной магнитной энергии $(B \times H)_{\max}$. Величина этого значения определяется с помощью измерительного прибора *ИП*, подключенного к выходу умножителя через однополупериодный пиковый детектор *ОПД*.

Рассмотренные устройства для определения параметров материала при периодическом перемагничивании испытуемых образцов основаны на применении индукционно-непрерывного метода измерения. Это ограничивает широкое использование таких устройств в производственных условиях, так как не обеспечивает получения высокого быстродействия. Последнее объясняется тем, что результат измерения получается в процессе многократного перемагничивания испытуемых образцов. Кроме того, быстродействие таких устройств ограничивается необходимостью нанесения на испытуемые магниты измерительных обмоток, что особенно сказывается при испытании изделий широкой номенклатуры.

В связи с этим рассмотренные способы непосредственного определения параметров материала при периодическом перемагничивании испытуемых магнитов наиболее успешно могут быть применены в тех случаях, когда измерение параметров по тем или иным причинам производится в лабораторных устройствах для определения характеристик магнитотвердых материалов. В этих случаях применение способов непосредственного определения параметров материала обеспечивает повышение точности и сокращает время измерения.

3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ В ОБРАЗЦЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

Индукционный метод измерения является единственным, обеспечивающим возможность измерения индукции непосредственно в испытуемом образце; но из-за присущих этому методу недостатков приходится отыскивать новые методы измерения. К ним, в частности, относится метод [41], основанный на измерении гальваномагнитных эффектов в самом испытуемом образце, возникающих при воздействии на него магнитного поля. Измерения в этом случае выполняются в замкнутой магнитной системе без коммутации магнитного поля.

Рассмотрим возможность применения такого метода измерения индукции в устройствах для определения параметров материала. При использовании эффекта Холла подвод тока питания и съем выходного напряжения осуществляется с помощью двух пар электродов, накладываемых на противоположные грани образца. Величина индукции определяется выражением

$$B_{\text{ист}} = \frac{e_x}{R_x I_{\text{п}}} f(a, b, l, S_s), \quad (17)$$

где e_x — ЭДС Холла; R_x — постоянная Холла материала образца; $I_{\text{п}}$ — ток питания; a, b, l — геометрические размеры магнита; S_s — площадь токовых электродов.

Как следует из выражения (17), измеренное значение индукции зависит от свойств материала, геометрических размеров образца и площади токовых электродов. Это приводит к необходимости калибровки устройства практически для каждого испытуемого образца, что значительно ограничивает возможность применения такого метода измерения индукции в производственных условиях. Рассматриваемый метод измерения может быть использован только при определении коэрцитивной силы по индукции, так как

В этом случае не требуется определения ее абсолютного значения. Сложность практической реализации подобных устройств связана с необходимостью наложения на образец токовых и холловских электродов и измерения малых (порядка нескольких микровольт) напряжений Холла.

Для определения коэрцитивной силы можно также использовать метод измерения эффекта магнитосопротивления в испытуемом образце. В этом случае на образец накладывается два электрода, с помощью которых производится индикация изменения его сопротивления под воздействием магнитного поля. Чувствительность электрической схемы при испытании образцов из литых магнитотвердых материалов должна обеспечивать возможность регистрации изменений сопротивления порядка сотых долей миллиома.

Изменение сопротивления в зависимости от индукции в образце при малых ее значениях ($\mu B \ll 1$) определяется выражением

$$\Delta R = R_0 A \mu^2 B_{\text{ист}}^2, \quad (18)$$

где R_0 — сопротивление образца при отсутствии магнитного поля; A — коэффициент, учитывающий геометрические размеры образца; μ — подвижность носителей материала образца.

Ввиду сложности практической реализации рассмотренных методов измерения индукции, основанных на определении гальваномагнитных эффектов непосредственно в испытуемых образцах, более целесообразно применять их при лабораторных исследованиях магнитных свойств магнитотвердых материалов.

Глава IV

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛА

1. НЕДОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛА ИСПЫТУЕМЫХ МАГНИТОВ ДО НАСЫЩЕНИЯ

При испытании магнитотвердых материалов на точность результатов измерения могут оказывать влияние некоторые дополнительные факторы [49], зависящие от условий проведения испытаний. Применительно к устройствам для определения параметров материала, к таким факторам следует отнести недоведение материала испытуемых магнитов до насыщения; влияние магнитной вязкости и неоднородности магнитных свойств материала магнитов; неоднородность внешнего магнитного поля и неточное определение состояния, при котором измеряется параметр; отклонение размеров испытуемых магнитов от размеров стандартных образцов при калибровке каналов измерения индукции и напряженности поля по результатам измерения последних и неточность установки испытуемых магнитов относительно преобразователей намагниченности и напряженности поля.

Для доведения современных магнитотвердых материалов до насыщения необходимы значительные намагничивающие поля, что связано с использованием достаточно громоздких магнитных систем и мощных источников питания. Стремление обеспечить компактность и экономичность измерительных устройств и в то же время не допустить появления дополнительной погрешности измерения за счет недомагничивания испытуемых магнитов приводит к необходимости рационального выбора максимального значения напряженности намагничивающего поля и методов его создания.

Согласно требованиям стандарта на определение характеристик образцов из магнитотвердых материалов [29] напряженность намагничивающего поля выбирается экспериментально таким образом, чтобы снижение ее на 25% не приводило к уменьшению коэрцитивной силы и остаточной индукции более чем на 1%. Исходя из этого условия

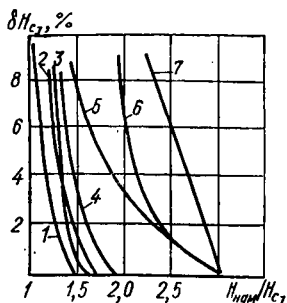


Рис. 13. График зависимости погрешностей измерения коэрцитивной силы, обусловленных недоведением материала до насыщения, от относительной величины намагничивающего поля.

литых высококоэрцитивных материалов и магнитотвердых ферритов. В качестве критерия, определяющего степень насыщения материала при намагничивании полями различной интенсивности, выбрана коэрцитивная сила по намагниченности.

В результате исследований получены зависимости погрешностей измерения коэрцитивной силы, обусловленных недоведением материала до насыщения, от относительной величины намагничивающего поля (рис. 13). За истинную величину коэрцитивной силы при подсчете погрешностей принималось ее значение, определенное при намагничива-

и рекомендованных стандартом значений намагничивающего поля, его кратность по отношению к коэрцитивной силе по индукции для литых материалов должна быть равной 4,5—5,5. Кратность намагничивающего поля по отношению к коэрцитивной силе по индукции для литых материалов находится в пределах 2,5—3,5 (что примерно в 1,5 раза ниже требований стандарта), для магнитотвердых ферритов — 3,5—5 [40].

Были проведены исследования, направленные на уточнение оптимальной величины намагничивающего поля при измерениях параметров постоянных магнитов из наиболее распространенных в практике

нии образцов пятикратным по отношению к коэрцитивной силе по намагниченности намагничивающим полем. Кривые на этом рисунке сняты для различных материалов: 1 — ЮНДК40Т8, 2 — ЮНДК35Т5, 3 — ЗБА2, 4 — 2БА1, 5 — ЮН14ДК24, 6 — ЮН14ДК24Т2, 7 — ЮНДК18.

Полученные данные свидетельствуют о том, что кратность намагничивающего поля, необходимого для доведения материала до насыщения, по отношению к коэрцитивной силе по намагниченности для литых материалов находится в пределах 2,5—3,0 и для анизотропных магнитотвердых ферритов — 1,5—2,0. Эти результаты довольно близко совпадают с данными работы [40] по литым материалам и дают несколько меньшее значение намагничивающего поля для магнитотвердых ферритов. Они позволяют более рационально подходить к выбору оптимальной напряженности намагничивающего поля и открывают пути к снижению габаритов и повышению экономичности устройств для намагничивания при испытании постоянных магнитов из высококоэрцитивных материалов.

2. ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОЙ ВЯЗКОСТИ И НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ИСПЫТУЕМЫХ МАГНИТОВ

Магнитная вязкость магнитных материалов проявляется в том, что намагниченность, соответствующая определенной напряженности приложенного магнитного поля, устанавливается не одновременно с ним, а достигает своего значения в течение некоторого промежутка времени. Наличие такого временного запаздывания (при определении функциональной зависимости двух магнитных величин или одной из них при заданных значениях другой в тех случаях, когда отсчет этих величин производится с некоторым смещением во времени) может приводить к появлению дополнительной погрешности измерения. Исследование

магнитной вязкости высококоэрцитивных сплавов [17] показало, что величина изменения намагниченности, обусловленного этим явлением, зависит от магнитного состояния материала и резко возрастает в полях, близких к коэрцитивной силе. Это дает основание считать, что влияние

магнитной вязкости должно проявляться при определении коэрцитивной силы.

Проведенные исследования [10] показали, что погрешность за счет влияния магнитной вязкости проявляется при измерении коэрцитивной силы в устройствах с разомкнутой магнитной системой при использовании индукционно-импульсного метода индикации состояния нулевой намагниченности. Это свя-

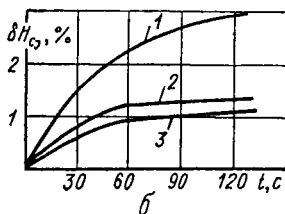
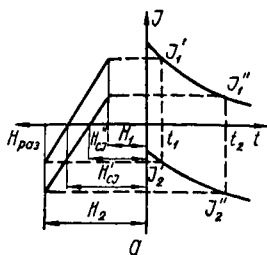


Рис. 14. Графики изменения намагниченности, обусловленные магнитной вязкостью материала (а), и зависимости погрешностей измерения коэрцитивной силы от времени выдержки в устройствах с разомкнутой системой (б).

зано с тем, что при таком методе измерения намагниченность определяется при двух значениях внешнего размагничивающего поля вблизи коэрцитивной силы; причем намагниченность измеряется в течение некоторого промежутка времени после установки поля, определяемого конструктивными особенностями устройства и индивидуальными навыками оператора.

Характер изменения намагниченности во времени для двух выбранных значений размагничивающего поля показан на рис. 14, а. Кривая $J_1' - J_1''$ соответствует полю $H_1 < H_{сз}$, кривая $J_2' - J_2''$ — полю $H_2 > H_{сз}$. Величина коэрцитивной силы при таких измерениях определяется

как напряженность размагничивающего поля $H_{раз}$ в точке пересечения прямой, соединяющей измеренные значения намагниченности, с осью абсцисс на графике $J = f(H_{раз})$. Из рис. 14, а следует, что значения коэрцитивной силы, определяемые в моменты времени t_1 и t_2 после установки размагничивающего поля, равны соответственно H'_{cJ} и H''_{cJ} . Различие между этими значениями и определяет величину дополнительной погрешности измерения коэрцитивной силы, возникающей за счет влияния магнитной вязкости материала. Так как в практике подобных испытаний интервал времени между установкой поля и измерением намагниченности не регламентируется, влияние магнитной вязкости проявляется в неповторимости результатов отдельных, последовательно проводимых измерений.

Влияние магнитной вязкости проявляется также в расхождении результатов, получаемых при измерении коммутационными и бескоммутационными методами, так как в первом случае измерения производятся непосредственно в момент изменения перемагничивающего поля, а во втором — с некоторой выдержкой после установки этого поля. Исходя из того, что при испытании стандартных образцов используются, как правило, коммутационные методы измерения, указанную погрешность необходимо учитывать при аттестации с помощью этих образцов аппаратуры, основанной на бескоммутационных методах измерения.

Количественная оценка влияния магнитной вязкости материала на погрешность измерения коэрцитивной силы в устройствах с разомкнутой магнитной системой проводилась при испытании образцов из различных материалов и разной выдержке времени от момента установки размагничивающего поля до измерения коэрцитивной силы. Полученные при этом зависимости изображены на рис. 14, б, где кривые 1, 2 и 3 соответствуют сплавам ЮНД4, ЮНДК18 и ЮН14ДК24Т2. Полученные опытные данные

показывают, что дополнительная погрешность измерения коэрцитивной силы, обусловленная этим явлением, при испытании магнитов из литых магнитотвердых материалов в устройствах с разомкнутой магнитной системой может составлять 1—1,5%.

Погрешность от магнитной вязкости проявляется гораздо меньше в устройствах, основанных на бескоммутационных методах измерения с индикацией нулевого значения намагниченности в процессе плавного увеличения размагничивающего поля (так как в этих случаях значительно сокращается промежуток времени между достижением нулевого значения намагниченности и отсчетом напряженности размагничивающего поля). Еще меньше указанная погрешность в устройствах с автоматическим уравниванием и фиксацией измеряемой величины, в которых этот промежуток времени сокращается еще больше и исключается возможность влияния на его длительность оператора, производящего измерения. При измерении таким способом снижается расхождение между результатами коммутационных и бескоммутационных методов измерения. Погрешность же по отношению к истинной статической кривой размагничивания, возникающая за счет влияния магнитной вязкости, в обоих случаях сохраняется.

При испытании постоянных магнитов измерения обычно проводятся при одном, случайно выбранном, положении испытуемого магнита относительно измерительных преобразователей в предположении, что магнитные свойства материала магнита достаточно однородны в его объеме. Качество магнитов, подлежащих испытанию, как правило, определяется на основании внешнего осмотра (отсутствие трещин, раковин, сколов и т. д.) и иногда рентгеновского анализа (отсутствие внутренних пустот, трещин и включений). Практически подобный контроль не выявляет образцы с неоднородностью магнитных свойств. Поэтому результаты измерений содержат погрешность, обусловленную этой неоднородностью. Такая погрешность проявляется в не-

повторяемости результатов отдельных измерений, выполненных при различном положении магнита относительно измерительных преобразователей. При измерениях в устройствах с замкнутой магнитной системой это имеет место в зависимости от выбора грани, у которой устанавливается преобразователь напряженности поля, и при смещении измерительной обмотки индукции. При измерениях в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой неповторяемость результатов зависит от выбора грани и торца, которыми образец обращен к преобразователям напряженности поля и намагниченности.

Исследования проявлений неоднородности магнитных свойств магнитотвердых материалов при испытаниях их в устройствах с разомкнутой и замкнутой магнитной системой [10, 16] показали, что обусловленные этим расхождения при измерении индукции (намагниченности) проявляются наиболее сильно в полях, близких к коэрцитивной силе, а при измерениях напряженности поля — вблизи остаточной индукции.

Экспериментальная оценка величины дополнительной погрешности, проведенная при определении коэрцитивной силы в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой, показала, что максимальное расхождение результатов отдельных измерений, обусловленное неоднородностью магнитных свойств материала, в среднем составляет 0,5—1,5%, а для отдельных образцов — 3—5%. Возможность в процессе испытаний, проводимых в таких устройствах, легко изменять положение контролируемого магнита относительно измерительных преобразователей позволяет исключить указанную погрешность повторением измерений в разных положениях магнита. Одновременно с этим при таких измерениях можно выявить образцы с резкой неоднородностью свойств. Последнее имеет большое значение для отработки режимов технологического процесса изготовления постоянных магнитов и оценки качества готовых изделий.

Неоднородность магнитных свойств магнитов при испытании их в устройствах, основанных на использовании различных методов измерения, приводит к несовпадению результатов этих испытаний. Так как погрешности магнитоизмерительных устройств определяются при испытании в них стандартных образцов, последнее обстоятельство (в тех случаях, когда метод измерения, используемый при аттестации образцов и применяемый в контролируемом устройстве, не совпадает) приводит к дополнительной погрешности аттестации. Такая погрешность возникает при аттестации устройств с неполностью замкнутой магнитной системой, так как в них используется бескоммутационный метод измерения, а для аттестации стандартных образцов применяется индукционно-импульсный (коммутационный) метод измерения.

При существующей технологии изготовления магнитотвердых материалов невозможно обеспечить получение стандартных образцов с высокой степенью однородности магнитных свойств, поэтому указанную погрешность необходимо учитывать и при экспериментальной оценке точности измерительных устройств принимать меры для ее устранения. Эффективной мерой снижения этой погрешности при аттестации устройств с неполностью замкнутой магнитной системой является использование рассмотренного выше способа усреднения результатов измерений, полученных в разных положениях испытуемого образца (рис. 15, а). Образец *A* может быть установлен относительно преобразователя намагниченности *B* в восьми различных положениях, условно обозначенных цифрами. На рис. 15, б, в графически показаны результаты испытаний двух стандартных образцов в устройстве с неполностью замкнутой магнитной системой. Образцы изготовлены из литых сплавов в соответствии с требованиями, предъявляемыми метрологическими организациями к стандартным образцам, и проходили в них аттестацию. На графиках для этих образцов изображена зависимость относительной погреш-

ности отдельных измерений δH_{cJ} от положения образца относительно чувствительных элементов. Индексом n обозначены номера граней, находящихся в непосредственной близости от преобразователя намагниченности в каждом

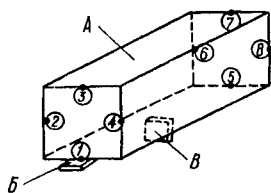
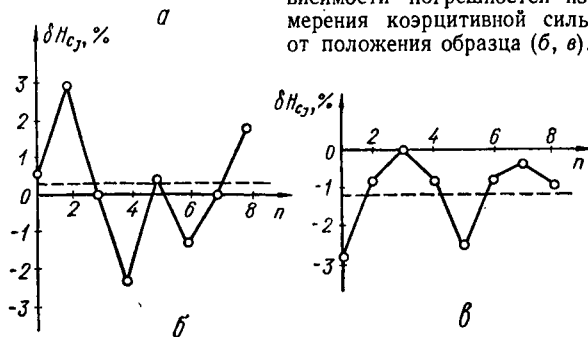


Рис. 15. Взаимное расположение испытуемого образца и измерительных преобразователей в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой (а) и графики зависимости погрешностей измерения коэрцитивной силы от положения образца (б, в).



из возможных положений измерения. Пунктирные горизонтальные линии соответствуют средним значениям относительной погрешности, полученным как результат усреднения восьми измерений для каждого образца. При многократных измерениях коэрцитивной силы в одном и том же положении образца отклонения результатов отдельных измерений от средних для данного положения значений не превышают 0,2%.

Из рис. 15 видно, что значительные отклонения результатов отдельных измерений, выполненных в различных положениях образцов, являются следствием неоднородности их магнитных свойств. Кроме того, эти данные показывают,

что использованная методика (при которой за результат измерений при определении погрешности аттестуемых устройств принимаются средние значения, полученные при измерениях в разных положениях) позволяет устранить дополнительную погрешность, обусловленную неоднородностью магнитных свойств стандартных образцов. Наиболее полно это достигается при усреднении результатов измерений, выполненных в восьми различных положениях образца относительно чувствительных элементов. Если по условиям испытаний такое усреднение затруднительно, вполне удовлетворительные результаты можно получить при усреднении по четырем измерениям, выполненным для противоположных граней образца. Некоторое увеличение дополнительной погрешности порядка 0,2—0,6% оправдывается в этом случае значительным сокращением времени испытаний.

3. НЕОДНОРОДНОСТЬ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И НЕТОЧНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТОЯНИЯ, ПРИ КОТОРОМ ИЗМЕРЯЮТСЯ ПАРАМЕТРЫ

При определении параметров постоянных магнитов значительное влияние на результат оказывает точность фиксации состояния, при котором производится измерение. Обусловленные этим погрешности возникают вследствие нечувствительности соответствующего индикатора и побочных факторов, влияющих на его работу. При испытаниях в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой такими побочными факторами являются неравномерная намагниченность образца и неоднородность размагничивающего поля, обусловленные незамкнутостью магнитной системы. Кроме того, неоднородность внешнего размагничивающего поля, при взаимном расположении испытуемого постоянного магнита и измерительных преобразователей в зазоре магнитной системы (см. рис. 9), приводит к появлению в месте установки преобразователя намагниченности попереч-

ной составляющей этого поля. Последнее обстоятельство также влияет на точность индикации состояния нулевой намагниченности.

Учитывая это, рассмотрим влияние указанных факторов на точность индикации состояния нулевой намагниченности образца в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой. Будем исходить из того, что при намагничивании материал испытуемого магнита доводится до насыщения по всему его объему. При снятии внешнего поля намагниченность по объему магнита будет неравномерна.

Для упрощения анализа рассмотрим для некоторого сечения усредненное значение намагниченности, величина которой зависит от напряженности внешнего магнитного поля $J_i = f(H_{вн})$. Эта функция непрерывна и может быть представлена в виде суммы членов степенного ряда:

$$J_i = J'_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial J'_0}{\partial H_{вн}} H_{вн} \right)_{H_{вн}=0}^n,$$

где J'_0 — средняя для произвольного сечения намагниченность в отсутствие размагничивающего поля.

Поскольку средняя намагниченность изменяется по длине магнита, $J'_0 = f(x)$, и напряженность размагничивающего поля в зазоре магнитной системы также изменяется по его длине, $H_{вн} = f(x)$, среднюю намагниченность для произвольного сечения магнита на основании последнего можно представить в виде

$$J_i = J_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial J_0}{\partial H_{вн}} H_{вн} \right)_{H_{вн}=0}^n + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \left\{ \frac{\partial J_0}{\partial x} x + \right. \\ \left. + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial J_0}{\partial H_{вн}} H_{вн} \right) x \right\}_{H_{вн}=0}^m,$$

где J_0 — остаточная намагниченность в нейтральном сечении магнита (при $H_{вн} = 0$ и $x = 0$).

Принимая обозначения

$$J_n = J_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial J_0}{\partial H_{\text{вн}}} H_{\text{вн}} \right)_{H_{\text{вн}}=0}^n$$

$$\text{и } \Delta J_i = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m!} \left\{ \frac{\partial J_0}{\partial x} x + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial J_0}{\partial H_{\text{вн}}} H_{\text{вн}} \right)^n x \right\}_{H_{\text{вн}}=0}^m,$$

из предыдущего выражения получаем

$$J_i = J_n + \Delta J_i, \quad (19)$$

где J_n — намагниченность в нейтральном сечении магнита; ΔJ_i — поправочный член, учитывающий неравномерность и неоднородность внешнего поля.

При заданном расположении преобразователя намагниченности в процессе размагничивания на него будет действовать составляющая H_J , определяемая намагниченностью магнита, и поперечная составляющая внешнего поля H_n , в результате чего выходной сигнал преобразователя

$$U_J = k_J (H_J + H_n), \quad (20)$$

где k_J — коэффициент преобразователя намагниченности.

Составляющая H_J пропорциональна потоку намагниченности, выходящему через торцевое сечение магнита, а на основании выражения (19) определяется следующим образом: $H_J = k'_J (J_n + \Delta J_T)$, где k'_J — коэффициент, зависящий от геометрических размеров магнита и положения его относительно преобразователя намагниченности.

Поперечная составляющая для данной магнитной системы определяется напряженностью размагничивающего поля и координатами точки размещения преобразователя намагниченности: $H_n = f(H_{\text{вн}}, x_n, y_n)$. Так как $\partial J_0 / \partial x < 0$ и $\partial J_0 / \partial H < 0$, составляющая H_J может достигать нулевого значения при $J_n > 0$ (т. е. при напряженности размаг-

ничающего поля меньшей, чем коэрцитивная сила испытуемого магнита).

Из полученных выражений следует, что дополнительная погрешность, обусловленная влиянием неравномерной намагниченности магнита и неоднородности внешнего поля, будет равна нулю при

$$k'_J \Delta J_T + H_{\pi} = 0.$$

Определить условия, при которых выполняется это равенство, аналитически невозможно. Экспериментальная оценка указанной дополнительной погрешности показывает, что ее величина зависит от соотношения геометрических размеров магнитов и возрастает при испытании магнитов с малой относительной длиной. В связи с этим при практическом использовании устройств с неполностью замкнутой магнитной системой необходимо применять некоторые дополнительные меры, обеспечивающие снижение этой дополнительной погрешности до значений, не превышающих 0,5—0,8%.

Рассмотрим погрешность, вызываемую нечувствительностью индикатора намагниченности. Эта погрешность возникает при измерении коэрцитивной силы по намагниченности. Изменению напряженности размагничивающего поля на величину $\Delta H_{\text{вн}}$ соответствует изменение намагниченности на величину ΔJ , что приводит к изменению составляющей H_J на величину ΔH_J . Момент полного размагничивания образца определяется индикатором намагниченности, имеющим порог чувствительности

$$\Omega = \Delta H_J = \beta C_J,$$

где β — минимальное фиксируемое отклонение указателя намагниченности; C_J — постоянная индикатора намагниченности.

При значениях размагничивающего поля, близких к коэрцитивной силе, кривая размагничивания для малых отклонений $\Delta H_{\text{вн}}$ может быть с достаточной точностью

аппроксимирована прямой. С учетом этого относительная погрешность измерения коэрцитивной силы, возникающая за счет нечувствительности индикатора намагниченности, определяется выражением

$$\delta H_{cJ\Omega} = \frac{\beta C_J}{H_{cJ}} \operatorname{ctg} \alpha_1, \quad (21)$$

где α_1 — угол наклона касательной к кривой размагничивания в точке, соответствующей коэрцитивной силе.

Определим значение $\operatorname{ctg} \alpha_1$. Размагничивающая часть гистерезисной петли аналитически [35] может быть представлена выражением

$$J_{\text{ист}} = J_r \frac{H_{cJ} - H_{\text{ист}}}{H_{cJ} - cH_{\text{ист}}}, \quad (22)$$

где c — постоянный коэффициент, определяемый свойствами материала.

При определении коэрцитивной силы по намагниченности выходные сигналы преобразователей не корректируются, и измерение осуществляется по кривой $H_J = f(H_{\text{изм}_0})$. Поэтому на основании выражения (22) с учетом соотношений (13) можем записать

$$\frac{k_1 k_1'}{k_J'} H_J = J_r \frac{H_{cJ} - H_{\text{изм}_0} + \frac{k_2 k_1'}{k_J'} H_J}{H_{cJ} - c \left(H_{\text{изм}_0} - \frac{k_2 k_1'}{k_J'} H_J \right)}. \quad (23)$$

Решая уравнение (23) относительно $H_{\text{изм}_0}$, находим

$$\operatorname{ctg} \alpha_1 = \left| \frac{dH_{\text{изм}_0}}{dH_J} \right|_{H_J=0}.$$

Проводя необходимые операции и подставляя результат в выражение (21), получаем окончательное выражение

для определения относительной погрешности:

$$\delta H_{c_{J\Omega}} = \frac{\beta C_J k_1'}{k_J'} \left[\frac{k_2}{H_{c_J}} - \frac{k_1}{J_r} (1 - c) \right].$$

Аналогично относительная погрешность измерения остаточной индукции, возникающая за счет нечувствительности индикатора напряженности поля,

$$\delta B_{r\Omega} = \frac{\beta C_H}{B_r} \operatorname{ctg} \alpha_2,$$

где C_H — постоянная индикатора напряженности поля; α_2 — угол наклона касательной к кривой размагничивания в точке, соответствующей остаточной индукции.

Так как при определении остаточной индукции в выходные сигналы преобразователей вносится коррекция, измерение производится по кривой $B_{\text{ист}} = f(H_{\text{ист}})$, которая аналитически [35] может быть представлена выражением

$$B_{\text{ист}} = B_r \frac{H_{c_J} - H_{\text{ист}}}{H_{c_J} - cH_{\text{ист}}} - \mu_0 H_{\text{ист}}.$$

Котангенс угла наклона касательной к кривой размагничивания в точке остаточной индукции определяется в этом случае из выражения

$$\operatorname{ctg} \alpha_2 = \left| \frac{dB_{\text{ист}}}{dH_{\text{ист}}} \right|_{H_{\text{ист}}=0}.$$

С учетом изложенного, окончательное выражение для определения относительной погрешности $\delta B_{r\Omega}$ принимает вид

$$\delta B_{r\Omega} = \beta C_H \left[\frac{1}{H_{c_J}} (1 - c) + \frac{\mu_0}{B_r} \right].$$

Исходное выражение для определения относительной погрешности измерения коэрцитивной силы по индукции, возникающей за счет нечувствительности индикатора

индукции, имеет вид

$$\delta H_{c_{B\Omega}} = \frac{\beta C_B}{H_{c_B}} \operatorname{ctg} \alpha_3,$$

где C_B — постоянная индикатора индукции; α_3 — угол наклона касательной к кривой размагничивания в точке, соответствующей коэрцитивной силе по индукции.

В этом случае, как и при определении остаточной индукции, измерение проводится по кривой $B_{\text{ист}} = f(H_{\text{ист}})$, а значение котангенса угла наклона касательной к кривой размагничивания может быть найдено из выражения

$$\operatorname{ctg} \alpha_3 = 1 / \left| \frac{dB_{\text{ист}}}{dH_{\text{ист}}} \right|_{H_{\text{ист}}=H_{c_B}}.$$

Окончательно относительная погрешность

$$\delta H_{c_{B\Omega}} = \beta C_B \frac{(h_c - c)^2}{B_r h_c (1 - c) + \mu_0 H_{c_B} (h_c - c)^2},$$

где $h_c = H_{c_j} / H_{c_B}$.

Оценка величины рассмотренных дополнительных погрешностей определения основных параметров материала, возникающих за счет нечувствительности соответствующих нулевых индикаторов, показывает, что значения этих погрешностей для реальных условий проведения испытаний находятся в пределах 0,2—0,4%. При подсчете погрешностей было принято, что относительная длина магнитов из литых материалов может изменяться в интервале от 1 до 5 и для магнитотвердых ферритов — от 0,5 до 1.

4. ОТКЛОНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ИСПЫТУЕМЫХ МАГНИТОВ ОТ РАЗМЕРОВ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ПО НИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

При определении параметров материала в устройствах с калибровкой каналов измерения индукции и напряженности поля по контрольным образцам возможно появление дополнительных погрешностей измерения, обусловленных отклонением геометрических размеров испытуемых магнитов от размеров контрольных образцов.

При измерении остаточной индукции в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой исходным для анализа дополнительной погрешности является выражение (14). При изменении геометрических размеров испытуемых образцов нарушается пропорциональность между истинными и измеряемыми значениями намагниченности и напряженности поля. Это и приводит к появлению рассматриваемой погрешности, которая определяется по формуле

$$\delta B_{\text{ист}k} = \frac{\mu_0}{B_{\text{ист}}} \left(\frac{\partial B_{\text{ист}}}{\partial H_J} dH_{Jk} + \frac{\partial B_{\text{ист}}}{\partial H_{\text{изм}_0}} dH_{\text{изм}_0k} \right),$$

где dH_{Jk} и $dH_{\text{изм}_0k}$ — приращения величин H_J и $H_{\text{изм}_0}$, обусловленные изменением геометрических размеров испытуемых магнитов. На основании выражений (2) — (5) значение измеренной напряженности поля

$$H_{\text{изм}_0} = H_{\text{вн}} - \frac{1}{k_1} (k_1 - k_2 - 1) J_{\text{ист}}. \quad (24)$$

Произведя соответствующие операции с учетом выражений (13), (24), при выполнении условий $B_{\text{ист}} = B_r$ и $H_{\text{ист}} = 0$, окончательно получаем

$$\delta B_{r_k} = \frac{1}{k_1} [k_2 \delta k_{2k} - (1 + k_1) \delta k_{1k} - (k_1 - k_2) \delta (k'_1/k'_j)_k], \quad (25)$$

где δk_{1k} , δk_{2k} и $\delta (k'_1/k'_j)$ — относительные изменения соответствующих поправочных коэффициентов, обусловленные изменением геометрических размеров испытываемых магнитов (см. рис. 7, 8).

При измерении коэрцитивной силы исходным для анализа является выражение (13), устанавливающее связь между действительным и измеренным значениями напряженности поля. Величина дополнительной погрешности в этом случае определяется выражением

$$\delta H_{\text{ист}k} = \frac{1}{H_{\text{ист}}} \left(\frac{\partial H_{\text{ист}}}{\partial H_{\text{изм}_0}} dH_{\text{изм}_0} + \frac{\partial H_{\text{ист}}}{\partial H_J} dH_{Jk} \right).$$

После соответствующих преобразований и с учетом того, что при определении коэрцитивной силы по индукции выполняется условие $H_{\text{ист}} = H_{CB}$ и $B_{\text{ист}} = 0$, получаем

$$\delta H_{CBk} = \frac{1}{k_1} [\delta k_{1k} - k_2 \delta k_{2k} - k_2 \delta (k'_1/k'_j)_k]. \quad (26)$$

Относительные изменения поправочных коэффициентов, входящих в выражения (25) и (26), могут быть найдены из соотношений

$$\begin{aligned} \delta k_{1k} &= \frac{l}{k_1 \sqrt{S}} \operatorname{tg} \gamma_1 \delta (l/\sqrt{S}); \\ \delta k_{2k} &= \frac{l}{k_2 \sqrt{a}} \operatorname{tg} \gamma_2 \delta (l/\sqrt{a}); \\ \delta (k'_1/k'_j)_k &= \frac{lk'_j}{k'_1 \sqrt{S}} \operatorname{tg} \gamma_3 \delta (l/\sqrt{S}), \end{aligned}$$

где γ_1 , γ_2 и γ_3 — углы наклона касательных к кривым $k_1 = f(l/\sqrt{S})$, $k_2 = f(l/\sqrt{a})$ и $k'_1/k'_j = f(l/\sqrt{S})$ (см. рис. 7, 8) в точках со значениями этих коэффициентов, соответствующими размерам испытываемых магнитов; $\delta (l/\sqrt{S})$ и $\delta (l/\sqrt{a})$ — относительные изменения соответствующих геометрических параметров магнитов.

Оценка дополнительных погрешностей измерения параметров материала, возникающих за счет изменения геометрических размеров испытуемых магнитов, показывает, что для реальных условий проведения испытаний эти погрешности при определении остаточной индукции не превышают 0,7% и при определении коэрцитивной силы — 0,2%. Эти значения погрешностей получены при условии, что относительная длина испытуемых магнитов находится в интервале от 0,5 до 4, а относительные изменения геометрических размеров магнитов составляют 1%.

5. НЕТОЧНОСТЬ УСТАНОВКИ ИСПЫТУЕМЫХ МАГНИТОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

При измерении параметров с помощью преобразователей, установленных на поверхности испытуемых магнитов, возможно появление дополнительных погрешностей, возникающих за счет неточной установки магнита относительно преобразователей. При измерениях в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой такие погрешности возникают вследствие того, что измеренные намагниченность и напряженность поля зависят от расстояния между магнитом и соответствующими преобразователями и изменяются при изменении этого расстояния в результате неточной их установки.

Величина рассматриваемой погрешности при определении остаточной индукции может быть определена из выражения

$$\delta B_{\text{ист}h} = \frac{\mu_0}{B_{\text{ист}}} \left(\frac{\partial B_{\text{ист}}}{\partial H_J} dH_{Jh} + \frac{\partial B_{\text{ист}}}{\partial H_{\text{изм}0h}} dH_{\text{изм}0h} \right),$$

где dH_{Jh} и $dH_{\text{изм}0h}$ — приращения величин H_J и $H_{\text{изм}0}$, обусловленные смещением испытуемых магнитов относи-

тельно преобразователей намагниченности и напряженности поля.

Выполнив необходимые преобразования, с учетом выражений (13), (24) и того, что при $B_{ист} = B_r$, $H_{ист} = 0$, получаем

$$\delta B_{r_h} = \frac{1}{k_1} [(k_1 - k_2) \delta k'_{J_h} + k_2 \delta k_{2h}], \quad (27)$$

где $\delta k'_{J_h}$ и δk_{2h} — относительные изменения поправочных коэффициентов при смещении испытуемых магнитов относительно преобразователей намагниченности и напряженности поля.

При измерении коэрцитивной силы по индукции дополнительная погрешность за счет смещения магнита определяется из выражения

$$\delta H_{ист_h} = \frac{1}{H_{ист}} \left(\frac{\partial H_{ист}}{\partial H_{изм_0}} dH_{изм_0} + \frac{\partial H_{ист}}{\partial H_J} dH_{J_h} \right),$$

которое после преобразований с учетом условия $H_{ист} = H_{c_B}$ и $B_{ист} = 0$ принимает вид

$$\delta H_{c_{B_h}} = \frac{k_2}{k_1} (\delta k'_{J_h} - \delta k_{2h}). \quad (28)$$

Относительные изменения поправочных коэффициентов, входящих в выражения (27) и (28), определяются из следующих соотношений:

$$\delta k_{2h} = \frac{h}{k_2} \operatorname{tg} \gamma_4 \delta(h);$$

$$\delta k'_{J_h} = \frac{\Delta h}{k'_J/k_{J_0}} \operatorname{tg} \gamma_5 \delta(\Delta h),$$

где γ_4 и γ_5 — углы наклона касательных к кривым $k_2 = f(h)$ и $k'_J/k_{J_0} = f(\Delta h)$ в точках со значениями этих коэффициентов, соответствующими размерам испытуемых магнитов; $\delta(h)$ и $\delta(\Delta h)$ — относительные изменения соответствующих величин.

Оценка рассмотренных дополнительных погрешностей показывает, что они не превышают 1,3% при определении остаточной индукции и 0,5% — при определении коэрцитивной силы. Указанные значения погрешностей получены при условии, что относительная длина испытуемых магнитов изменяется в интервале от 0,5 до 4, относительное изменение расстояния между магнитом и преобразователем напряженности поля составляет 10%, а исходное положение преобразователя намагниченности определяется условием $\Delta h = 0$ (см. рис. 7). Если по каким-либо соображениям, например конструктивным, это условие не выполняется, дополнительные погрешности за счет смещения магнитов могут существенно возрасти. В таких случаях необходимо принимать дополнительные меры для их снижения.

6. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ В УСТРОЙСТВАХ С НЕПОЛНОСТЬЮ ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

Неравномерная намагниченность магнита приводит к тому, что измеренное значение коэрцитивной силы может оказаться меньше истинного. Неоднородность внешнего поля вызывает появление в месте расположения преобразователя намагниченности поперечной составляющей размагничивающего поля, которая при симметричном расположении испытуемого магнита в зазоре магнитной системы (см. рис. 9) совпадает по направлению с полем, создаваемым намагниченностью магнита. В результате этого измеренное значение коэрцитивной силы завышается.

В реальных условиях испытания влияние таких факторов, как неоднородность внешнего поля и неравномерная намагниченность магнита, при определенных соотношениях геометрических размеров образцов взаимно компенсируется. Во всех остальных случаях возникает дополнительная

погрешность измерения, которая значительно возрастает при испытании образцов с малой относительной длиной.

Кривые, изображенные на рис. 16, характеризуют изменения магнитных свойств образцов в процессе их размагничивания при измерении коэрцитивной силы по намагниченности. Построение кривых выполнено в координатах

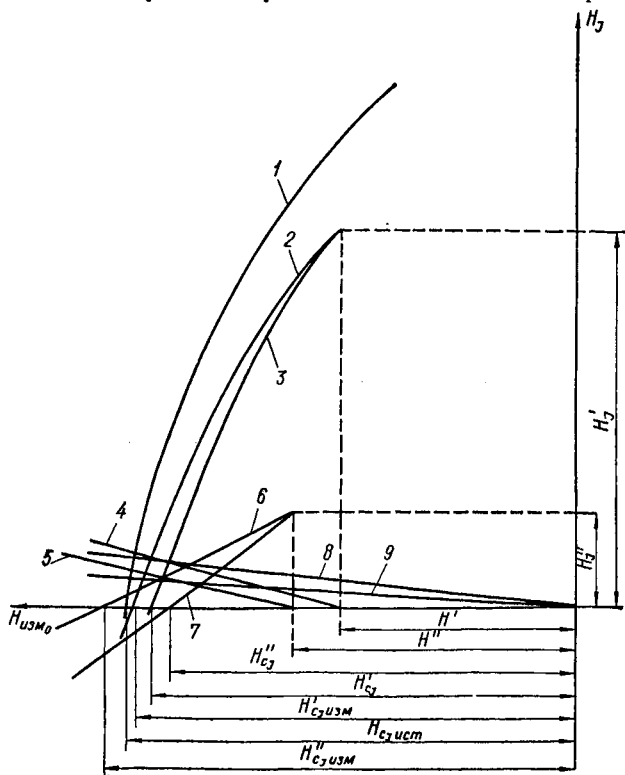


Рис. 16. График изменения магнитных свойств магнитов при измерениях в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой.

H_J и $H_{изм}$, где под H_J понимается напряженность поля, воздействующего на преобразователь намагниченности.

Кривая 1 условно представляет кривую размагничивания материала, а точка $H_{cJ_{ист}}$ соответствует значению коэрцитивной силы, измеренной в замкнутой магнитной системе. Дальнейшие построения выполнены для двух образцов с максимальной и минимальной относительной длиной. Величины H'_J и H' характеризуют магнитное состояние образца максимальной длины после его намагничивания, а величины H''_J и H'' — аналогичное состояние образца минимальной длины. Кривые 3 и 7 отражают изменение магнитных свойств этих образцов при увеличении напряженности размагничивающего поля без учета действия поперечной составляющей. Точки H'_{cJ} и H''_{cJ} соответствуют значениям коэрцитивной силы, которые должны быть получены при этих условиях.

Прямые 8 и 9 представляют собой зависимости поперечной составляющей размагничивающего поля от его продольной составляющей для точек, в которых находится преобразователь намагниченности при испытаниях образцов с максимальной и минимальной длиной. Прямые 4 и 5 — аналогичные зависимости поперечной составляющей размагничивающего поля от напряженности поля, измеренной преобразователем напряженности поля.

Кривые 2 и 6, построенные по зависимостям 3—4 и 5—7, характеризуют изменения магнитных свойств рассматриваемых образцов с учетом действия поперечной составляющей размагничивающего поля. Точки $H'_{cJ_{изм}}$ и $H''_{cJ_{изм}}$ соответствуют значениям коэрцитивной силы, полученным в реальных условиях измерения и отличающимся от истинной величины. Для образцов с максимальной длиной $H'_{cJ_{изм}} < < H_{cJ_{ист}}$, а для образцов с минимальной длиной $H''_{cJ_{изм}} > > H_{cJ_{ист}}$.

Из анализа кривых следует, что на величину рассмотренной погрешности можно влиять, изменяя воздействие поперечной составляющей поворотом преобразователя намагниченности относительно горизонтальной плоскости.

Таблица 3

Номер магнита	Геометрические размеры			Магнитные свойства	
	l , мм	S , см ²	l/\sqrt{S}	B_r , Т	H_{cJ} , кА/м
1	19,0	1,8	1,4	1,05	47,7
2	19,0	5,4	0,8	1,15	50,0
3	30,0	5,8	1,2	1,11	56,4
4	80,0	18,3	1,8	0,56	39,8
5	50,0	1,9	3,6	1,1	45,0
6	80,0	5,2	3,4	1,15	46,0

При этом чувствительность преобразователя к потоку образца при малых углах поворота изменяется незначительно, а воздействие поперечной составляющей можно регулировать в достаточно широких пределах.

Для экспериментальной проверки такого способа компенсации влияния поперечной составляющей измерялась коэрцитивная сила по намагниченности для шести образцов

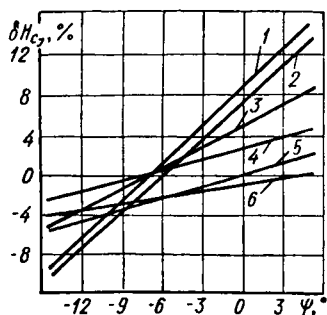


Рис. 17. График зависимости погрешностей измерения коэрцитивной силы от угла установки преобразователя намагниченности.

из литых материалов с различной относительной длиной при разных углах установки преобразователя намагниченности. Данные о геометрических размерах и магнитных свойствах этих образцов приведены в табл. 3, а результаты измерений графически показаны на рис. 17. Здесь под

$\delta H_{сг}$ понимается относительная погрешность измерения коэрцитивной силы. Эта погрешность определена по отношению к коэрцитивной силе образцов, полученной при их испытании в замкнутой магнитной системе. Номера у кривых на рисунке соответствуют номерам магнитов в табл. 3.

Из графиков следует, что небольшим (порядка 5°) поворотом преобразователя намагниченности можно компенсировать влияние неравномерной намагниченности испытуемого магнита и неоднородности размагничивающего поля. За счет этого существенно снижается погрешность измерения коэрцитивной силы в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой при испытании магнитов с малой относительной длиной. Погрешность испытания магнитов с максимальной длиной, как видно из графиков, возрастает при этом в допустимых пределах.

Рассмотренный способ компенсации влияния поперечной составляющей размагничивающего поля является весьма эффективным средством повышения точности измерения в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой. Однако его использование затрудняется в тех случаях, когда относительные размеры испытуемых магнитов изменяются в очень широких пределах. При этом возникает необходимость в перестройке компенсации при переходе от одних типоразмеров к другим, что конструктивно неудобно.

Более целесообразным в таких случаях является применение способа, основанного на введении в цепь измерителя намагниченности дополнительного сигнала, пропорционального напряженности поля в зазоре магнитной системы [7]. Выходной сигнал преобразователя намагниченности U_1 с учетом воздействия поперечной составляющей определяется выражением (20). Для получения сигнала компенсации в схему устройства вводится дополнительный преобразователь напряженности поля либо используется выходное напряжение, снимаемое с основного преобразователя. Последний вариант может быть применен в тех случаях, когда

существует возможность гальванически разделить входные и выходные цепи преобразователей намагниченности и напряженности поля.

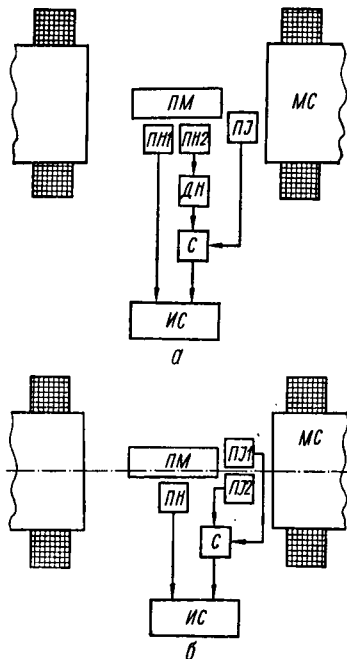


Рис. 18. Схема компенсации влияния поперечной составляющей поля за счет использования дополнительного преобразователя напряженности поля (а) и двух преобразователей намагниченности (б).

Структурная схема устройства, основанного на таком способе компенсации, показана на рис. 18, а. Так же, как и в ранее рассмотренных устройствах, испытуемый постоянный магнит ПМ располагается в зазоре магнитной системы МС. У торца магнита и в плоскости его нейтрального сечения установлены преобразователи намагниченности ПН и напряженности поля ПН1, ПН2 (дополнительный). Выходной сигнал этого преобразователя (ПН2) через делитель напряжения ДН и сумматор С подается в цепь измерителя намагниченности.

При использовании такой схемы включения суммарное выходное напряжение преобразователей ПН и ПН2 определяется выражением

$$U'_j = k_J (H_J + H_n) - k_{H_2} k_d \times \\ \times [H_{вн} - \frac{1}{k_1} (k_1 - k_2 - 1) J_{ист}], \quad (29)$$

где k_{H_2} — коэффициент преобразования дополнительного преобразователя напряженности поля; k_d — коэффициент передачи делителя напряжения.

Из выражения (29) следует, что при выборе коэффициента передачи делителя так, чтобы выполнялось условие

$$k_J H_{\Pi} - k_{H_d} k_d H_{\text{вн}} = 0, \quad (30)$$

напряжение, подаваемое на выходной прибор измерителя намагниченности, будет пропорционально действительному значению намагниченности.

Так как в рассматриваемых устройствах при одном и том же фиксированном значении воздушного зазора проводятся испытания магнитов различной длины, условие компенсации, определяемое выражением (30), может нарушаться. В этом случае целесообразно изменять коэффициент передачи делителя в зависимости от длины испытуемого магнита либо устанавливать его постоянным для определенного диапазона длин при условии, что возникающая погрешность не будет превышать допустимой величины. Настройка компенсации осуществляется (без испытуемого магнита и при наличии магнитного поля в зазоре системы) изменением коэффициента передачи делителя до тех пор, пока выходной прибор измерителя намагниченности не покажет нулевого значения.

Из анализа рассмотренного способа компенсации следует, что при ее введении влияние поперечной составляющей размагничивающего поля может быть снижено примерно на порядок. Это определяет достаточно высокую эффективность и целесообразность использования такой компенсации в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой.

Хотя при рассмотренном способе уменьшения влияния поперечной составляющей возможна перестройка компенсации, тем не менее необходимость такой перестройки при изменении размеров испытуемых магнитов в широких пределах создает определенные неудобства и усложняет процесс проведения испытаний. Поэтому наиболее приемлем способ компенсации, основанный на использовании двух преобразователей намагниченности, расположенных

симметрично относительно продольной оси магнитной системы [8].

Структурная схема устройства, реализующего такой способ компенсации влияния поперечной составляющей, показана на рис. 18, б. В отличие от ранее рассмотренных, это устройство снабжено двумя преобразователями намагниченности $ПЖ1$ и $ПЖ2$. Поперечная составляющая в этом случае компенсируется за счет симметричного расположения преобразователей относительно продольной оси магнитной системы и последовательного включения их выходных сигналов. Так как при изменении длины испытуемого магнита оба преобразователя смещаются в продольном направлении одновременно, нарушения компенсации при этом не происходит. Магнит при таких измерениях смещается в вертикальном направлении и располагается асимметрично относительно продольной оси магнитной системы. Поэтому выходные напряжения обоих преобразователей, обусловленные намагниченностью магнита, суммируются.

Выражения для определения истинных значений индукции и напряженности поля для этого случая с учетом соотношений (13) и (14) могут быть записаны следующим образом:

$$B_{\text{ист}} = \mu_0 [k'_1 (k_1 - k_2) (H_{J_1}/k'_{J_1} + H_{J_2}/k'_{J_2}) + H_{\text{изм}_0}];$$

$$H_{\text{ист}} = H_{\text{изм}_0} - k'_1 k_2 (H_{J_1}/k'_{J_1} + H_{J_2}/k'_{J_2}),$$

где H_{J_1} и H_{J_2} — составляющие напряженности поля (создаваемого намагниченностью магнита), которые воздействуют соответственно на первый и второй преобразователи намагниченности; k'_{J_1} и k'_{J_2} — коэффициенты, учитывающие расположение первого и второго преобразователей относительно испытуемого магнита.

В результате такого включения и расположения преобразователей намагниченности относительно магнитной системы и испытуемого магнита компенсируется поперечная составляющая размагничивающего поля и увеличивается

чувствительность измерителя намагниченности. Это в свою очередь обеспечивает повышение точности и упрощение процесса измерения. Кроме того, использование двух последовательно включенных преобразователей намагниченности, смещенных в противоположных направлениях относительно горизонтальной плоскости установки магнита, обеспечивает снижение дополнительных погрешностей, возникающих за счет неточной установки магнитов. В данном случае это достигается за счет симметричного характера кривых $k'_J/k'_J_0 = f(\Delta h)$ относительно точки $\Delta h = 0$ (см. рис. 7).

Рассмотренные дополнительные погрешности измерения остаточной индукции и коэрцитивной силы определяются по формулам:

$$\delta B_{r_h} = \frac{1}{k_1} [(k_1 - k_2)(\delta k'_{J_{1h}} + \delta k'_{J_{2h}}) + k_2 \delta k_{2h}]; \quad (31)$$

$$\delta H_{c_{B_h}} = \frac{k_2}{k_1} (\delta k'_{J_{1h}} + \delta k'_{J_{2h}} - \delta k_{2h}),$$

где $\delta k'_{J_{1h}}$ и $\delta k'_{J_{2h}}$ — относительные изменения соответствующих поправочных коэффициентов, обусловленные смещением испытуемых магнитов относительно преобразователей намагниченности.

Оценка эффективности такого способа снижения этих дополнительных погрешностей показывает, что при использовании двух преобразователей намагниченности их величина находится в допустимых пределах.

СПОСОБЫ СОЗДАНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ И РАЗМАГНИЧИВАЮЩИХ ПОЛЕЙ

1. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Основными элементами магнитоизмерительной аппаратуры, предназначенной для определения характеристик магнитотвердых материалов и постоянных магнитов, являются устройства для создания намагничивающих и размагничивающих полей. В такие устройства обычно входят источник питания и магнитная система, в воздушном зазоре которой помещается испытуемый образец.

Так как коэрцитивная сила широко применяемых магнитотвердых материалов достаточно велика, для доведения их до насыщения и размагничивания, как было показано выше, требуются сильные магнитные поля, напряженность которых может достигать 400—800 кА/м, а при испытаниях в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой — 1000—1200 кА/м. Создание таких полей связано с использованием мощных источников питания, которые должны обеспечивать возможность регулировки тока нагрузки в широких пределах. Для построения подобных источников весьма перспективны появившиеся в последнее время силовые полупроводниковые тиристорные преобразователи, выгодно отличающиеся малыми габаритами, незначительной мощностью потерь, высокой надежностью и хорошими регулировочными характеристиками.

Отмеченные достоинства тиристорных преобразователей удачно могут быть использованы в регулируемых источниках питания магнитоизмерительной аппаратуры, в связи с тем, что в этих случаях источник питания работает на нагрузку с большой индуктивностью. Последнее обстоятельство исключает необходимость применения допол-

нительных средств для сглаживания пульсаций выпрямленного тока, которые в схемах с тиристорами при активной нагрузке могут быть довольно значительными. Кроме того, в таких источниках питания может быть обеспечена стабилизация выходного напряжения в достаточно широких пределах изменения его величины. Однако при использовании их в магнитоизмерительной аппаратуре возникает необходимость в стабилизации не напряжения, а тока питания намагничивающего устройства. Это позволяет повысить стабильность магнитного поля в его рабочем зазоре и исключить изменения напряженности поля, возникающие в результате изменения сопротивления обмотки.

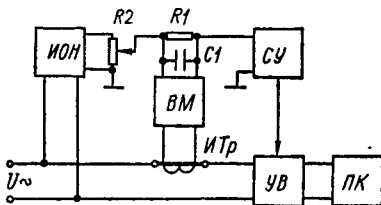


Рис. 19. Схема регулируемого источника со стабилизацией тока питания магнитной системы.

Рассмотрим схему регулируемого источника питания постоянного тока, удовлетворяющего этим требованиям (рис. 19). Она включает силовой управляемый выпрямитель *УВ*, преобразующий переменное напряжение промышленной частоты в плавно регулируемый постоянный ток питания катушек магнитной системы *ПК*. Работой выпрямителя *УВ* управляет схема управления *СУ*, построенная с использованием фазоимпульсного принципа регулирования. Изменение величины тока в нагрузке осуществляется изменением значения управляющего напряжения, подаваемого на вход схемы управления.

В отличие от известных схем [22] (когда для получения сигнала, пропорционального току нагрузки, на выходе моста включается делитель) в рассматриваемой схеме для этого в цепь питания на стороне переменного тока вводится измерительный трансформатор *ИТр*, вторичная обмотка которого через выпрямительный мост *ВМ* подключается

к сопротивлению $R1$ и сглаживающей емкости $C1$ [9].

При соответствующем выборе параметров $ИТр$ напряжение, снимаемое с его вторичной обмотки, в достаточно широких пределах можно считать пропорциональным току нагрузки. Величина выпрямленного тока в этом случае регулируется изменением уровня опорного напряжения с помощью резистора $R2$, включенного на выходе источника опорного напряжения $ИОН$.

Для нахождения условий, при которых обеспечивается стабилизация, проанализируем выражение, определяющее величину среднего выпрямленного тока в нагрузке. Так как падение напряжения на первичной обмотке измерительного трансформатора пренебрежимо мало, для рассматриваемой схемы можно записать

$$I_n = U_m (1 + \cos \alpha) / \pi R_n, \quad (32)$$

где U_m — амплитуда напряжения питания; R_n — сопротивление нагрузки; α — угол отпирания тиристора.

При фазоимпульсном способе регулировки с учетом экспоненциального характера изменения пилообразного напряжения, подаваемого на блокинг-генераторы схемы управления, справедливо соотношение

$$\alpha = -2\omega\tau \ln(1 - U_y/U_n), \quad (33)$$

где τ , U_n — постоянная времени цепи заряда и напряжение питания генератора пилообразных напряжений; U_y — управляющее напряжение; ω — частота сети.

С учетом выражений (32) и (33) ток в нагрузке

$$I_n = U_m [1 + \cos 2\omega\tau \ln(1 - U_y/U_n)] / \pi R_n, \quad (34)$$

а относительное изменение его величины при изменении амплитуды питающего напряжения U_m и сопротивления нагрузки R_n может быть найдено на основании выражения

$$\delta I_n = \frac{1}{I_n} \left(\frac{\partial I_n}{\partial U_m} dU_m + \frac{\partial I_n}{\partial R_n} dR_n + \frac{\partial I_n}{\partial U_y} dU_y \right),$$

из которого получаем

$$\delta I_H = \delta U_m - \delta R_H + \frac{2U_m \omega \tau}{\pi R_H I_H (U_H - U_Y)} \times \\ \times \sin 2\omega \tau \ln \left(1 - \frac{U_Y}{U_H} \right) dU_Y,$$

где δU_m и δR_H — относительные изменения амплитуды напряжения питания и сопротивления нагрузки соответственно.

Для определения величины dU_Y воспользуемся соотношением $U_Y = U_1 - U_2 = k_T I_H - U_2$, где U_1 и U_2 — падения напряжения соответственно на сопротивлениях $R1$ и $R2$; k_T — коэффициент пропорциональности между выходным напряжением измерительного трансформатора и током нагрузки.

Выполнив операцию дифференцирования и подставив полученный результат в предыдущее выражение, окончательно получим

$$\delta I_H = \frac{\delta U_m - \delta R_H}{1 - \frac{2U_m \omega \tau k_T}{\pi R_H (U_H - U_Y)} \sin 2\omega \tau \ln \left(1 - \frac{U_Y}{U_H} \right)}. \quad (35)$$

Выражения (34) и (35) позволяют определить основные характеристики источника питания — его относительную регулировочную характеристику

$$\frac{I_H}{I_{H \max}} = 0,5 \{ 1 + \cos 2\omega \tau \ln [1 - U'_Y (1 - e^{-\frac{\pi}{2\omega \tau}})] \} \quad (36)$$

и величину коэффициента стабилизации, равного отношению $\delta U_m - \delta R_H$ к относительному изменению тока δI_H :

$$k_{ст} = 1 - \frac{2U_m \omega \tau k_T}{\pi R_H U_{Y \max}} \frac{\sin 2\omega \tau \ln [1 - U'_Y (1 - e^{-\frac{\pi}{2\omega \tau}})]}{U'_H - U'_Y}, \quad (37)$$

где $U'_Y = U_Y / U_{Y \max}$ — относительная величина управляющего напряжения; $U'_H = U_H / U_{Y \max}$ — относительная

величина напряжения питания; $U_{y \max}$ — значение управляющего напряжения, при котором тиристор полностью запирается.

Как видно из выражения (37), коэффициент стабилизации схемы при прочих равных условиях зависит от величины управляющего напряжения и имеет минимальное значение $k_{ст} = 1$ при $U_y = 0$ и $U_y = U_{y \max}$. Зависимость $k_{ст}$ от управляющего напряжения, и тем самым от тока нагрузки, характерна для тиристорных источников питания. При жестких требованиях к стабильности выпрямленного тока она ограничивает область регулировочной характеристики источника, в пределах которой эти требования выполняются.

Ниже приводятся результаты испытаний регулируемого источника питания, в котором используется изложенный принцип стабилизации тока нагрузки. Этот источник предназначен для питания магнитных систем измерительной аппаратуры мощностью до 10 кВт при напряжении 220 В и обеспечивает возможность плавной регулировки тока питания магнитной системы от нуля до максимального значения. Силовой управляемый выпрямитель источника питания собран по двухполупериодной мостовой схеме на тиристорах типа ВКУ-50 и кремниевых диодах типа ВК-50.

Измерительный трансформатор схемы стабилизации собран на витом тороидальном сердечнике из стали ХВП со средним диаметром 49 мм и сечением 520 мм². Первичная обмотка трансформатора, включенная в цепь питания источника, состоит из 5 витков, намотанных проводом большого сечения. Вторичная, измерительная, обмотка имеет 50 витков и через выпрямительный мостик, собранный на диодах Д226, подключается к сопротивлению $R1 = 1$ кОм и сглаживающей емкости $C = 30$ мкФ.

Снятая кривая зависимости выходного напряжения измерительного трансформатора (напряжения на сопротивлении $R1$ при разомкнутой цепи источника опорного

напряжения) от тока нагрузки для такой схемы включения трансформатора и выбранных его параметров показана на рис. 20. Описываемый источник питания при работе его совместно с магнитной системой для создания сильных магнитных полей ($R_n = 8 \text{ Ом}$, $L_n = 1,9 \text{ Гн}$) позволяет получать максимальный ток нагрузки $I_{n \text{ max}} = 21 \text{ А}$. Выбран-

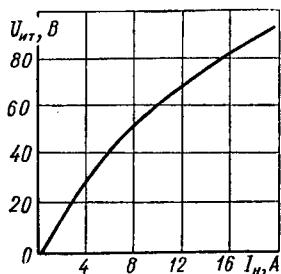


Рис. 20. График зависимости выходного напряжения измерительного трансформатора от тока нагрузки.

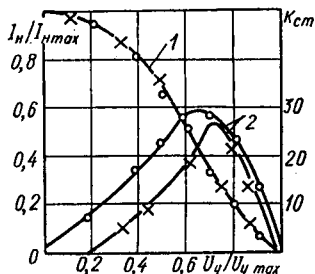


Рис. 21. Относительная регулировочная характеристика источника (I) и кривая зависимости коэффициента стабилизации от относительной величины напряжения управления (2).

ные элементы схемы управления ($\tau = 4,95 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, $U_{y \text{ max}} = 2,35 \text{ В}$, $U_n = 10 \text{ В}$) и стабилизации ($k_\tau = 6,1 \text{ В/А}$) обеспечивают максимальное расчетное значение коэффициента стабилизации $k_{ст \text{ max}} = 28$.

На рис. 21 изображены относительная регулировочная характеристика I источника $I_n/I_{n \text{ max}} = f(U_y/U_{y \text{ max}})$ и кривые зависимости коэффициента стабилизации от относительной величины напряжения управления $k_{ст} = f(U_y/U_{y \text{ max}})$. Точки, обозначенные на графике кружочками, соответствуют расчетным значениям этих величин, крестиками — получены экспериментально.

Из рисунка видно, что для регулировочной характеристики расчетные и экспериментальные значения хорошо

совпадают. Для кривой 2, определяющей величину коэффициента стабилизации, наблюдается расхождение между расчетными и экспериментальными результатами. Это расхождение обусловлено тем, что расчетная кривая при нелинейной регулировочной характеристике, строго говоря, справедлива для малых изменений возмущающих факторов. В реальных условиях коэффициент стабилизации определяется при изменении сетевого напряжения на 10—15%. Кроме того, при выводе расчетного выражения не учитывалось снижение коэффициента стабилизации схемы, связанное с потерей напряжения измерительного трансформатора на выходном сопротивлении источника опорного напряжения, с нестабильностью напряжения этого источника и других элементов схемы. Указанные обстоятельства приводят к некоторому снижению расчетного значения коэффициента стабилизации и смещению реальной характеристики, наиболее сильно проявляющемуся при больших значениях тока нагрузки.

Из графиков следует, что область, в которой величина реально полученного коэффициента стабилизации находится в пределах $k_{ст} \geq 10$, т. е. ток нагрузки изменяется не более чем на 1% при изменении напряжения питания и сопротивления нагрузки на 10%, находится в диапазоне изменения тока от 6 до 73% от его максимального значения. Внутри этого диапазона стабильность тока нагрузки возрастает и достигает своего максимального значения при $I_n/I_{n\max} = 0,3$.

В ряде случаев при построении магнитоизмерительной аппаратуры возникает необходимость в обеспечении высокой стабильности магнитного поля не во всем диапазоне регулировочной характеристики, а при определенных его значениях. Такие требования появляются, например, в тех случаях, когда поле в зазоре магнитной системы используется в качестве образцового для калибровки измерителей напряженности поля или магнитного потока.

При решении такой задачи схема стабилизации тока на-

грузки может быть несколько упрощена. На рис. 22, а изображена структурная схема источника, обеспечивающего достаточно высокую стабильность тока нагрузки при его фиксированном значении. В качестве опорного напряжения в этой схеме использовано падение напряжения на стабилитроне D . Величина стабилизированного тока устанавливается изменением значения этого напряжения (соот-

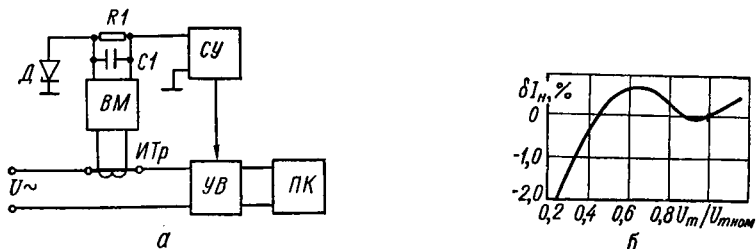


Рис. 22. Схема источника питания для получения фиксированных значений магнитного поля (а) и график относительного изменения тока нагрузки при изменении сетевого напряжения для этого источника (б).

ветствующим выбором элементов цепочки стабилизации и величины сопротивления $R1$).

На рис. 22, б изображена экспериментально снятая для такой схемы характеристика, определяющая относительное изменение тока нагрузки δI_n при изменении напряжения питания. Эта характеристика соответствует номинальному значению тока $I_{n \text{ ном}} = 4 \text{ А}$ и получена при использовании для стабилизации опорного напряжения цепочки из трех последовательно включенных стабилитронов Д810.

Из рисунка следует, что при изменении сетевого напряжения в пределах от 1,1 до 0,8 $U_{m \text{ ном}}$ величина тока нагрузки изменяется не более чем на 0,25%, а при снижении напряжения от 220 до 80 В, т. е. до 0,35 $U_{m \text{ ном}}$, изменение тока не превышает 1,0%. Это свидетельствует о достаточно высокой степени стабилизации, обеспечиваемой такой схемой.

2. ИМПУЛЬСНЫЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА ЕМКОСТНОМ МЕТОДЕ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Создание современной автоматизированной аппаратуры для определения магнитных характеристик магнитотвердых материалов и параметров постоянных магнитов неразрывно связано с разработкой экономичных и высокопроизводительных намагничивающих устройств. Такими, в частности, являются импульсные намагничивающие устройства.

В настоящее время применяются устройства с накоплением энергии в батарее конденсаторов и с непосредственным питанием через прерыватель от сети переменного напряжения. Устройства первого типа накапливают энергию в конденсаторах сравнительно длительно и отдают ее при разряде за короткий промежуток времени. Поэтому они не создают перегрузок питающей сети и позволяют получать намагничивающие поля большой напряженности. Разряд конденсаторов в таких устройствах в большинстве случаев происходит непосредственно на намагничивающую обмотку.

В устройствах с непосредственным питанием от сети переменного напряжения с помощью той или иной системы, включающей управляемый клапан и схему управления его работой, используется один полупериод сетевого напряжения. Эти устройства, как правило, содержат импульсный понижающий трансформатор, вторичная обмотка которого замыкается на низкоомную намагничивающую систему. Устройства с непосредственным питанием от сети обладают более высоким быстродействием и позволяют получать намагничивающие поля большей длительности. Однако они, по сравнению с устройствами первого типа, создают гораздо большую нагрузку на питающую сеть. Это является их главным недостатком и в ряде случаев ограничивает возможность получения больших значений напряженности намагничивающего поля.

Благодаря отмеченным достоинствам, устройства, ос-

нованные на использовании емкостных накопителей, довольно широко применяются для создания импульсных магнитных полей. При использовании таких устройств в измерительной аппаратуре к ним предъявляются требования обеспечения постоянства амплитуды напряженности создаваемого магнитного поля, высокого быстродействия и надежности, возможности автоматизации процесса измерения.

Рассмотрим способы построения емкостных намагничивающих устройств, обеспечивающие выполнение этих требований за счет применения в зарядных и разрядных цепях полупроводниковых тиристорных преобразователей. Структурная схема устройства с ограничением напряжения заряда конденсаторной батареи и управляющим конденсатором [43] показана на рис. 23. Ее основным элементом является батарея импульсных конденсаторов *БК*, которая при намагничивании разряжается через управляемый клапан *Д2* на импульсные катушки *ИК*, а заряжается от сети переменного тока через ограничительный резистор *R1* и тиристор *Д1*.

В известных устройствах для создания импульсных полей [26], обеспечивающих постоянство амплитуды разрядного тока, применяется стабилизация напряжения заряда конденсаторной батареи. В описываемой схеме эта задача решается ограничением напряжения непосредственно на батарее и ее разрядом в тот момент, когда напряжение достигает заданной величины. Такое решение обеспечивает

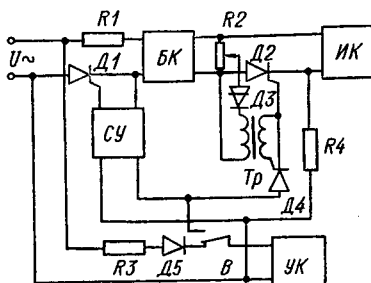


Рис. 23. Схема импульсного намагничивающего устройства с ограничением напряжения заряда конденсаторной батареи и управляющим конденсатором.

необходимую стабильность намагничивающего поля и одновременно позволяет повысить быстродействие схемы, так как при этом появляется возможность питания зарядных цепей повышенным напряжением, что приводит к снижению времени заряда.

Полагая, что сопротивление утечки батареи и элементов схемы, включаемых параллельно ей, значительно превышает величину сопротивления ограничительного резистора R_1 , определим время заряда из выражения

$$t_3 = -R_1 C \ln(1 - U_C/U_{ист}), \quad (38)$$

где R_1 — ограничительное сопротивление; C — емкость батареи конденсаторов; U_C — напряжение на батарее; $U_{ист}$ — напряжение источника питания.

Рис. 24. График зависимости времени заряда батареи конденсаторов от напряжения источника питания.

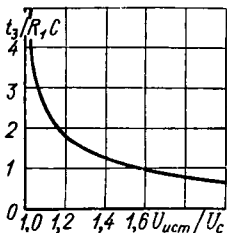


График зависимости $t_3/R_1C = f \times (U_{ист}/U_C)$, рассчитанной из выражения (38), которая характеризует снижение времени заряда при увеличении напряжения источника питания, изображен на рис. 24. Из этого графика следует, что при питании схемы стабилизированным напряжением $U_{ист} = U_C$ время заряда батареи до этого напряжения бесконечно велико. Принимая, что в этом случае напряжение батареи достигает значения $U_{ист}$ с точностью до 1%, можно записать $U_{ист_0} = 1,01 U_C \approx U_C$. При выполнении этого условия $t_3 = 4,6 R_1 C$. Увеличение напряжения источника, например на 20 и 50% ($U_{ист_1} = 1,2 U_C$ и $U_{ист_2} = 1,5 U_C$), снижает время заряда соответственно в 2,6 и 4,2 раза.

Эффективность такого снижения времени заряда батарей конденсаторов определяется тем, что в этом случае максимальное значение зарядного тока, определяемое выражением $I_3 = U_{ист}/R_1$, возрастает также на 20 и 50%. При аналогичном снижении времени заряда за счет умень-

шения сопротивления ограничительного резистора $R1$ максимальный зарядный ток увеличивается в 2,6 и 4,2 раза. Это связано со значительной перегрузкой элементов зарядной схемы и питающей сети, что в практических условиях является недопустимым.

Для реализации описанного способа стабилизации в схему введен узел ограничения напряжения, который при определенном значении последнего открывает тиристор $D4$ (рис. 23) и подает отпирающий импульс на силовой управляемый клапан $D2$. Формирование этого импульса осуществляется с помощью управляющего конденсатора $УК$, который в момент срабатывания схемы разряжается (через переключатель B и открывшийся тиристор $D4$) на управляющий переход клапана $D2$.

Схема ограничения напряжения батареи конденсаторов включает в себя делитель напряжения $R2$, диодистор $D3$ и трансформатор Tr , вторичная обмотка которого замкнута на управляющий переход тиристора $D4$. Необходимый уровень ограничения напряжения устанавливается с помощью делителя $R2$. При достижении заданного уровня этого напряжения диодистор пробивается, во вторичной обмотке трансформатора Tr возникает импульс напряжения, который открывает тиристор $D4$. Управление работой схемы выполняется переключателем B , обеспечивающим в исходном положении заряд конденсатора $УК$ через ограничительное сопротивление $R3$ и выпрямитель $D5$. В положении переключателя, соответствующем намагничиванию, управляющий конденсатор отключается от своего зарядного источника и подключается к схеме управления $СУ$, открывающей тиристор $D1$, и к закрытому тиристорам $D4$.

С этого момента начинается заряд батареи $БК$. При достижении заданного уровня напряжения срабатывает схема ограничения напряжения, открывается клапан $D2$ — батарея разряжается. Так как при этом управляющий конденсатор также разряжается, тиристор $D1$ закрывается и повторного заряда батареи не происходит. Для повторения

намагничивающего импульса необходимо перевести переключатель *B* в исходное положение и зарядить конденсатор *УК*, после чего схема готова к дальнейшей работе.

В реально построенном по этой схеме импульсном намагничивающем устройстве в качестве накопительной емкости использована батарея импульсных электролитических конденсаторов типа ЭФ-1300 с номинальным напряжением заряда 300 В и общей емкостью 24 000 мкФ. Схема управления тиристором *Д1* в зарядной цепи батареи (тиристор типа ВКУ-10) состоит из синхронизирующей цепочки и двухкаскадного усилителя импульсов, на выходе которого включен блокинг-генератор. Питание усилителя осуществляется от управляющего конденсатора.

При наличии на управляющем конденсаторе напряжения и замыкании переключателя *B* синхронизирующие импульсы, поступающие на вход усилителя, усиливаются и подаются на блокинг-генератор, работающий в ждущем режиме. Сформированные импульсы с выходной обмотки блокинг-генератора поступают на управляющий переход тиристора *Д1* и открывают его, обеспечивая заряд батареи.

В существующих устройствах импульсного намагничивания в качестве источника импульсного поля используются обычно низкоомные маловитковые (6—12 витков) разрядные катушки. В отдельных случаях батареи конденсаторов разряжаются на сравнительно многovitковые (50—100 витков) дополнительные катушки магнитной системы. В первом случае устройство работает при больших значениях (5—10 кА) разрядного тока, во втором — эта величина не превышает нескольких сотен ампер. Исходя из этого, выбирается управляемый клапан в разрядной цепи. При больших значениях тока в качестве последнего используются игнитроны (чаще всего типа И-100/1,0 или И2-140/0,8). Для малых значений тока известны схемы с тиристорными преобразователями.

Схема, показанная на рис. 23, обладает определенной универсальностью с точки зрения использования того или

иногo разрядногo вентиля. Примененный в схеме конденсаторный формирoватель позволяет получать отпирающие импульсы, по амплитуде и мощности достаточные для поджигания игнитронсв. В схеме могут быть использованы и полупроводниковые силовые вентиля. В этом случае для снижения амплитуды управляющего импульса последовательно с управляющим электродом вентиля вводится ограничительный резистор R_4 , сопротивление которого определяется типом использованного тиристора.

Испытания описанного импульсного намагничивающего устройства показали, что при работе его с низкоомными (порядка $5 \cdot 10^{-3}$ Ом) маловитковыми импульсными катушками можно получить разрядный ток с амплитудой 8—10 кА при длительности импульса около 2 мс. Кроме того, было показано, что при таких значениях разрядного тока в качестве разрядного вентиля целесообразно использовать управляемые лавинные тиристоры типа ТЛ-200. Эти тиристоры позволяют надежно коммутировать разрядные токи указанной величины, отличаются малыми габаритами, бесшумностью работы и меньшим (по сравнению с игнитронами) внутренним падением напряжения, что способствует увеличению разрядного тока.

Возможность использования в разрядных цепях емкостных намагничивающих устройств силовых полупроводниковых управляемых вентилях, отличающихся малым напряжением и мощностью управления, позволяет упростить рассмотренную схему. В частности, можно исключить из нее конденсаторный формирoватель отпирающих импульсов. Последнее, в свою очередь, повышает надежность и быстродействие намагничивающих устройств, а также упрощает возможность их использования в автоматической измерительной аппаратуре (так как исключает необходимость выполнения промежуточных операций, связанных с предварительным зарядом управляющего конденсатора).

Структурная схема импульсного намагничивающего устройства с ограничением напряжения заряда конденсаторной

батареи и управлением разрядным тиристором непосредственно от трансформатора схемы ограничения изображена на рис. 25, а. Основным элементом схемы, так же, как и в рассмотренной выше, является батарея импульсных конденсаторов *БК*. Заряд батареи осуществляется от сети переменного тока через ограничительный резистор *R1* и

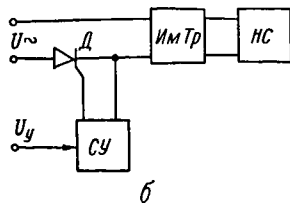
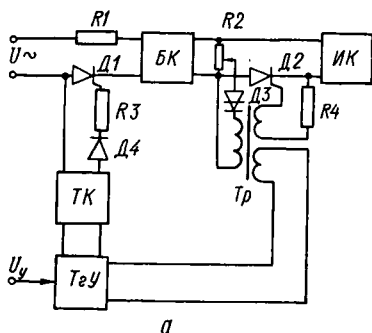


Рис. 25. Схемы импульсного на­магничивающего устройства с управлением разрядным тиристором непосредственно от схемы ограничения напряжения (а) и с непосредственным питанием от сети переменного напряжения (б).

зарядный тиристор *Д1*, разряд батареи на импульсные катушки *ИК* — через разрядный тиристор *Д2*. Ограничение напряжения на *БК* происходит с помощью схемы ограничения напряжения, включающей делитель напряжения *R2*, динистор *Д3* и трансформатор *Тр*. Вторичная обмотка трансформатора в этом случае замкнута непосредственно на управляющий переход разрядного тиристора, что обеспечивает его открытие при достижении напряжения батареи заданного уровня ограничения.

Зарядный тиристор управляется с помощью дополнительной обмотки трансформатора схемы ограничения, триггера управления *ТгУ* и транзисторного ключа *ТК*, замыкающего через резистор *R3* и диод *Д4* анод и управляющий электрод тиристора *Д1*.

В начальный момент при подаче управляющего напряжения на вход триггера управления *ТгУ* последний перебра-

сывается в такое устойчивое состояние, при котором ключ TK замыкается и открывает тиристор $Д1$. С этого момента начинается заряд батареи конденсаторов, который продолжается до тех пор, пока напряжение на батарее не достигнет заданного уровня ограничения. При этом динистор пробивается импульсом напряжения, возникающим во вторичной обмотке трансформатора Tr , открывается тиристор $Д2$, и батарея разряжается.

Одновременно с разрядом батареи импульсом напряжения в дополнительной обмотке трансформатора Tr триггер управления $TгУ$ перебрасывается в исходное положение, при котором ключ TK размыкается и запирает тиристор $Д1$; при этом повторного заряда батареи конденсаторов не происходит.

Испытания импульсного намагничивающего устройства, построенного по описанной схеме, показали, что при использовании в качестве разрядного вентиля лавинных тириستоров типа ТЛ-200 это устройство надежно обеспечивает получение разрядных токов с амплитудой до 10 кА. При повышении напряжения питания на 30—40% по отношению к уровню ограничения в таких намагничивающих устройствах можно получить быстроедействие до 2 с.

3. ИМПУЛЬСНЫЕ НАМАГНИЧИВАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПИТАНИЕМ ОТ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Импульсные намагничивающие устройства с непосредственным питанием от сети переменного напряжения позволяют получать значительно большее быстроедействие по сравнению с устройствами, основанными на емкостном принципе накопления энергии.

Структурная схема намагничивающего устройства с непосредственным питанием от сети переменного напряжения изображена на рис. 25, б. Ее основной элемент —

импульсный понижающий трансформатор *ИмТр*, первичная обмотка которого с помощью управляемого вентиля подключается к сети переменного напряжения. При подаче на вход схемы управления *СУ*, синхронизированной с сетью, управляющего напряжения U_y открывается управляемый вентиль, и через него проходит один полупериод сетевого напряжения. Вторичная обмотка импульсного трансформатора замкнута на обмотку намагничивающей системы *НС*, в зазоре которой располагается намагничиваемый постоянный магнит.

Характерной особенностью подобных намагничивающих устройств является возможность возникновения во вторичных цепях обратного импульса тока, приводящего к появлению размагничивающего поля в рабочем зазоре намагничивающей системы. При неудачном выборе параметров намагничивающей цепи это размагничивающее поле может достигать значительной величины. Последнее приводит к частичному размагничиванию только что намагниченного магнита и может являться причиной неправильного определения его магнитных свойств. Рациональный выбор параметров намагничивающей цепи приводит к существенному снижению амплитуды обратного выброса тока, однако полностью устранить его таким образом невозможно. Учитывая, что наличие обратного выброса совершенно недопустимо при использовании намагничивающих устройств в магнитоизмерительной аппаратуре, рассмотрим принцип построения импульсных намагничивающих устройств с непосредственным питанием от сети [4], позволяющий полностью устранить этот недостаток.

Для реальных устройств длительность намагничивающего импульса — 15—18 мс, время нарастания обратного выброса — около 0,01 мс, время его затухания достигает нескольких секунд. Поэтому при теоретическом анализе с достаточным основанием можно считать, что процесс аperiodического изменения напряженности поля обратного выброса начинается от момента времени $t = 0$. Это позво-

ляет рассматривать получающуюся зависимость напряженности поля $H = f(t)$ в зазоре устройства при повторных импульсах как результат наложения импульсного поля с постоянной амплитудой H_0 (рис. 26) на экспоненциально изменяющееся поле выброса $h = h_0 e^{-t/\tau}$ и использовать для определения параметров обратного выброса выражение

$$H = H_0 - h_0 e^{-t/\tau}, \quad (39)$$

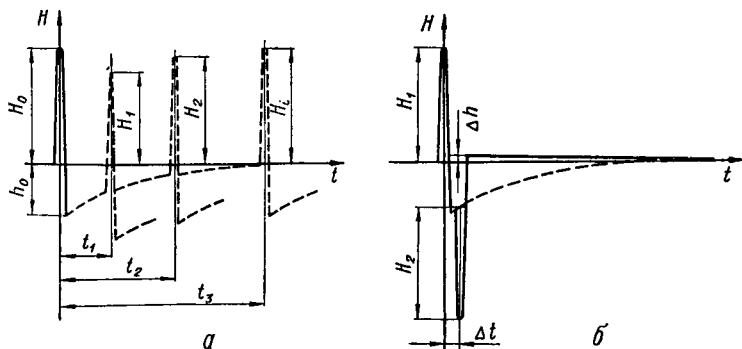


Рис. 26. Графики изменения напряженности импульсного намагничивающего поля при наложении дополнительных намагничивающих импульсов (а) и намагничивании парными импульсами противоположной полярности (б).

где h_0 , τ — амплитуда и постоянная времени аperiodического процесса соответственно.

При отыскании параметров обратного выброса поля следует провести усреднение результатов их определения, полученных для нескольких значений t_i . Для этого необходимо вычислить величины $h_i = H_0 - H_i$ для значений t_i и по результатам этих вычислений определить значения искомых параметров обратного выброса тока.

Используя такой прием, с учетом выражения (39), для определения постоянной времени τ и амплитуды обратного выброса h_0 в интервале времени от t_{i-1} до t_i и принимая

$\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ и $\lambda_i = h_{i-1}/h_i$, можно записать:

$$\tau = \frac{\Delta t_i}{\ln \lambda_i}; \quad h_0 = \frac{H_i - H_{i-1}}{\lambda_i^{-t_{i-1}/\Delta t_i} - \lambda_i^{-t_i/\Delta t_i}}.$$

Для устранения обратного выброса тока может быть использован способ его компенсации. При этом коммутацией питающего напряжения обеспечивается получение пары импульсов намагничивающего тока, и, следовательно, импульсов поля чередующейся полярности (рис. 26), следующих один за другим в непосредственной близости. Так как постоянная времени вторичной цепи τ во много раз превышает длительность намагничивающих импульсов, их обратные выбросы, накладываясь друг на друга, взаимно компенсируются.

Оставшийся незначительный некомпенсированный скачок обратного поля с амплитудой Δh практически не оказывает влияния на качество намагничивания и точность измерения параметров испытуемых постоянных магнитов. Его величина, как видно из рис. 26, б, при равенстве амплитуд прямого H_1 и обратного H_2 намагничивающих импульсов определяется периодом их следования Δt и постоянной времени вторичной цепи.

Используя выражение (39) и пренебрегая временем нарастания обратного выброса по сравнению с длительностью намагничивающего импульса, определяем амплитуду некомпенсированного скачка:

$$\Delta h = h_0 (1 - e^{-\Delta t/\tau}).$$

Оценка величины Δh на основании этого выражения показывает, что при периоде следования намагничивающих импульсов, в 2—5 раз превышающем их длительность, величина некомпенсированного скачка составляет 0,4—0,9 кА/м. В тех случаях, когда по условиям работы подобный размагничивающий скачок, несмотря на его малую величину, все же недопустим, для его полной компенсации описанный способ может быть видоизменен. Это изменение

заключается в том, что амплитуда второго намагничивающего импульса выбирается меньше амплитуды первого. При этом для обеспечения полной компенсации должно быть выполнено условие

$$H_2 \leq H_1 e^{-\Delta t/\tau}.$$

Намагничивающее устройство с непосредственным питанием от сети, в котором использован такой принцип обеспечения полной компенсации обратного выброса (рис. 27), в отличие от рассмотренного ранее снабжено двумя встречно-параллельно включенными управляемыми вентилями-тиристорами $D1$ и $D2$. Благодаря такому включению управляемых вентилях через первичную обмотку импульсного понижающего трансформатора $ИмТр$ при намагничивании проходят два разнополярных полупериода сетевого напряжения. Схема управления в этом случае состоит из схемы синхронизации $СС$, формирователей отпирающих импульсов прямого и обратного полупериодов $ФИ1$ и $ФИ2$ и фазосдвигающей цепочки $ФС$, включенной на входе $ФИ2$. Схема синхронизации совместно с формирователями импульсов обеспечивает отпирание управляемых вентилях при соответствующей полярности сетевого напряжения. Наличие фазосдвигающей цепочки позволяет регулировать фазу отпирания управляемого вентиля обратного полупериода по отношению к сетевому напряжению и тем самым уменьшать амплитуду обратного намагничивающего импульса таким образом, чтобы обеспечить полную компенсацию обратного размагничивающего выброса.

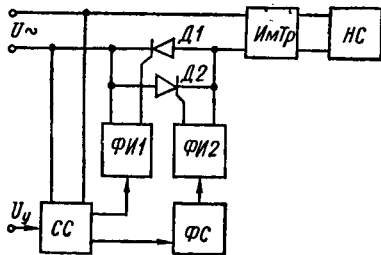


Рис. 27. Схема намагничивающего устройства с непосредственным питанием от сети и использованием парных намагничивающих импульсов.

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ

Существующие методы испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов основаны на определении их магнитных характеристик в процессе плавного размагничивания предварительно намагниченных образцов. Для осуществления такого размагничивания в соответствующей магнитоизмерительной аппаратуре обычно используются достаточно мощные источники постоянного размагничивающего поля, которые целесообразно также применять при намагничивании. В этом случае может быть рекомендован способ комбинированного намагничивания [12], при котором импульсное магнитное поле накладывается на стационарное, создаваемое постоянным током.

Эффективность этого способа прежде всего в том, что часть общего намагничивающего поля создается постоянным током, в результате чего может быть значительно (примерно на 30—40%) снижена напряженность импульсного поля и соответственно уменьшены мощность и габариты аппаратуры. Кроме того, при таком способе намагничивания повышается эффективность использования самих импульсных источников, и исключается возможность частичного размагничивания испытуемых постоянных магнитов в случае возникновения обратной полуволны разрядного тока.

Рассмотрим способ комбинированного намагничивания для получения импульсных полей с использованием емкостных накопителей, получивших наиболее широкое распространение в измерительной аппаратуре.

В большинстве случаев импульсные устройства, основанные на емкостном принципе накопления энергии [30, 37], работают в аперiodическом режиме, близком к критическому. Это обстоятельство связано с тем, что при работе в периодическом режиме, несмотря на наличие в схеме управляемого вентиля, в цепи возможно возникновение отрицательной полуволны разрядного тока. Появление

этой полувоины недопустимо, так как вызывает частичное размагничивание намагничиваемого постоянного магнита и приводит к дополнительной погрешности измерения остаточной индукции и точек начального участка кривой размагничивания. Для предотвращения возможности образования отрицательных импульсов разрядного тока пара-

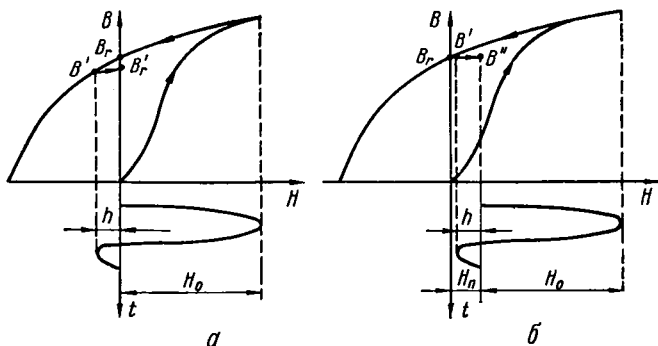


Рис. 28. Кривые изменения магнитного состояния намагничиваемых постоянных магнитов при импульсном намагничивании (а) и импульсном намагничивании с постоянным подмагничиванием (б).

метры схемы выбираются такими, чтобы обеспечить аperiodический характер разряда. Причем выполнение этого условия в ряде случаев достигается за счет искусственного увеличения активного сопротивления цепи, что, в свою очередь, приводит к снижению максимального значения тока. Кроме того, увеличение активного сопротивления [13] снижает длительность процесса, что нежелательно с точки зрения обеспечения полного промагничивания образцов.

Отсечка обратной полувоины шунтированием намагничивающих обмоток встречно включенным вентилям также не дает положительных результатов. В этом случае возникают значительные затруднения при согласовании сопротивлений шунтирующего вентиля и намагничивающей обмотки,

так как последняя обычно имеет малое активное сопротивление.

Более рациональным способом устранения отрицательного воздействия обратной полуволны разрядного тока является применение комбинированного намагничивания.

Диаграмма, изображенная на рис. 28, а, соответствует импульсному намагничиванию при наличии обратной полуволны. В этом случае H_0 — максимальное значение импульсного намагничивающего поля, h — амплитуда обратной размагничивающей полуволны. В результате воздействия намагничивающей полуволны магнитное состояние образца изменяется по кривой намагничивания, достигает насыщения и по кривой гистерезисного цикла изменяется до точки B_r , соответствующей остаточной индукции материала. При отрицательной полуволне индукция изменяется по кривой размагничивания от точки B_r до B' и по кривой возврата до точки B'_r .

При последующем увеличении размагничивающего поля в процессе испытания образца изменение его свойств в пределах этого поля $H_{\text{разм}} \leq h$ происходит по кривой возврата B'_r , B' , а не по кривой размагничивания, что вызывает погрешность в определении магнитных характеристик на этом начальном участке кривой размагничивания.

Изменение магнитных свойств намагничиваемого образца при наличии подмагничивающего поля представлено на рис. 28, б. Здесь $H_{\text{п}}$ — значение напряженности подмагничивающего поля. При условии $H_{\text{п}} \geq h$ индукция под воздействием импульсного поля возрастает по кривой намагничивания и снижается по гистерезисной петле до точки B' , затем по кривой возврата перемещается в точку B'' . При снятии подмагничивающего поля индукция изменяется по кривой возврата от точки B'' до B' и далее по гистерезисной петле до точки B_r . Таким образом, при наличии подмагничивающего поля обратная полуволна импульсного намагничивающего поля не вызывает частич-

ного размагничивания намагничиваемого постоянного магнита.

Наиболее просто такой способ устранения влияния обратной полуволны разрядного тока при использовании комбинированного намагничивания может быть реализован в устройствах для испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов, основанных на бескоммутационном методе измерения.

Это объясняется тем, что при бескоммутационном методе измерения намагничивание испытуемых магнитов и измерение индукции и напряженности поля в разных точках кривой размагничивания производятся одновременно и в определенной степени независимо друг от друга. При этом для создания подмагничивающего поля могут быть использованы катушки магнитной системы и элементы схемы установки, предназначенные для получения размагничивающего поля, необходимого при определении точек кривой размагничивания.

Структурная схема устройства, реализующего способ комбинированного намагничивания (рис. 29), содержит блок импульсного намагничивания и блок намагничивания постоянным током. Блок импульсного намагничивания построен по схеме рис. 25 с питанием зарядных цепей повышенным напряжением и с использованием принципа ограничения напряжения батареи конденсаторов *БК*. Для этого служат повышающий трансформатор *ПТр* и схема ограничения напряжения *ОН*, управляющая работой зарядного тиристора *Д1* и разрядного тиристора *Д2*.

Блок намагничивания постоянным током *БНП* состоит из управляемого двухполупериодного тиристорного

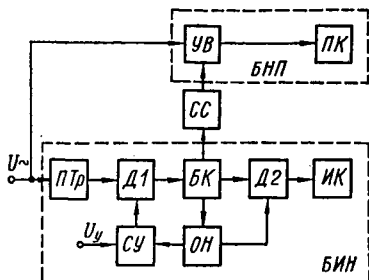


Рис. 29. Схема устройства для комбинированного намагничивания.

выпрямителя $УВ$ и катушек магнитной системы $ПК$. Схема синхронизации $СС$ должна синхронизировать работу $УВ$ разрядом батареи конденсаторов таким образом, чтобы в момент разряда в катушках магнитной системы протекал максимальный постоянный намагничивающий ток.

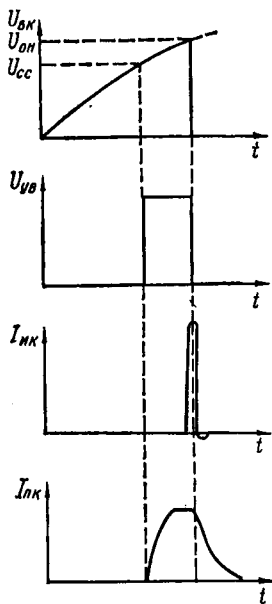


Рис. 30. Диаграмма напряжений и токов для режима комбинированного намагничивания.

Для синхронизации работы блока импульсного намагничивания $БИН$ и блока намагничивания постоянным током управление выпрямителем $УВ$ осуществляется напряжением батареи конденсаторов $БК$. При определенном значении этого напряжения схема синхронизации $СС$ подает отпирающее напряжение и полностью открывает управляемый выпрямитель $УВ$. Напряжение, при котором срабатывает схема синхронизации, выбирается таким, чтобы к моменту разряда $БК$ нарастание постоянного тока в катушках магнитной системы полностью закончилось. Отключение тока в катушках постоянного намагничивания происходит в момент разряда батареи конденсаторов при снижении напряжения на ней до нуля.

Диаграмма напряжений и токов, характеризующих режим комбинированного намагничивания, приведена на рис. 30, где $U_{БК}$ — напряжение на батарее конденсаторов $БК$; $U_{УВ}$ — напряжение на выходе управляемого выпрямителя $УВ$; $I_{ИК}$ — ток в катушках импульсного намагничивания $ИК$, $I_{ПК}$ — ток в катушках постоянного намагничивания $ПК$; $U_{СС}$ и $U_{ОН}$ — значения напряжения батареи

конденсаторов $U_{БК}$, при которых срабатывают схема синхронизации $СС$ и схема ограничения напряжения $ОН$ соответственно.

Устройство управляется подачей в начальный момент управляющего сигнала U_y на схему управления $СУ$ зарядного тиристора $Д1$. При этом схема управления открывает зарядный тиристор, в результате чего начинается заряд батареи конденсаторов $БК$.

При достижении напряжения $U_{СС}$ открывается управляемый выпрямитель $УВ$, и подается питание в катушки постоянного намагничивания. При напряжении $U_{ОН}$ процесс комбинированного намагничивания завершается разрядом батареи конденсаторов на импульсные катушки $ИК$. В этот момент сигналом со схемы ограничения напряжения $ОН$ схема управления $СУ$ возвращается в исходное положение, при котором тиристор $Д1$ запирается.

Г л а в а VI

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

1. ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА РАБОТЫ И ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНОЙ ЦЕПИ НА АМПЛИТУДУ И ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ИМПУЛЬСА В НАМАГНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ЕМКОСТНОГО ТИПА

Импульсные намагничивающие устройства, основанные на емкостном принципе накопления энергии, с точки зрения физических процессов, происходящих в них, представляют собой электрическую цепь, состоящую из емкости, активного сопротивления и индуктивности. Для расчета переходных процессов в такой цепи реальная схема импульсного устройства может быть представлена

эквивалентной схемой (рис. 31). Здесь C — емкость батареи конденсаторов, R_3 — эквивалентное активное сопротивление и L_3 — эквивалентная индуктивность цепи. Подобная эквивалентная схема импульсной цепи отображает переходный процесс разряда с некоторой погрешностью, вызванной тем, что распределенные параметры действительной цепи заменены сосредоточенными параметрами. Кроме того, при такой эквивалентной схеме не учитывается нелинейный характер сопротивления управляемого разрядного вентиля.

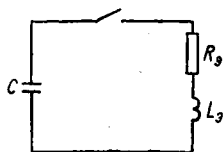


Рис. 31. Эквивалентная схема импульсного намагничивающего устройства емкостного типа.

Тем не менее, как показала экспериментальная проверка [13], уравнения переходных процессов, составленные для цепи с сосредоточенными параметрами, достаточно хорошо отображают процессы, проходящие в реальной схеме, а полученные на их основании расчетные выражения позволяют с необходимой точностью определять максимальную

величину и длительность намагничивающего тока.

В зависимости от выбора емкости, индуктивности и активного сопротивления в цепи, изображенной на рис. 31, возможны три различных режима разряда — аperiodический, критический и периодический. Аperiodический режим для аналогичной импульсной цепи достаточно подробно проанализирован в работе [30]. С точки зрения получения максимальной амплитуды намагничивающего тока более выгодным является периодический режим. Поскольку в схеме используется управляемый вентиль, обладающий способностью в значительной степени отсекаать отрицательную полуволну при периодическом разряде, и при использовании способа комбинированного намагничивания устраняется отрицательное влияние обратного выброса тока, целесообразно при анализе переходных процессов и определении оптимальных параметров цепи рассмотреть все три режима.

Для аperiodического режима ($R_3 > 2 \sqrt{L_3/C}$) выражение, определяющее величину тока разряда, имеет вид

$$i = - \frac{U_C}{L_3 (\alpha_1 - \alpha_2)} (e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}),$$

где $\alpha_{1,2} = -\beta \pm \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}$; $\beta = \frac{R_3}{2L_3}$; $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_3 C}}$.

Из этого выражения можно определить максимальное значение тока импульса I_{\max} и время нарастания тока t_H , за которое он изменяется от нуля до этого значения:

$$I_{\max} = \frac{2U_C}{R_3 (1 - x_1)} \left(\frac{1 + x_1}{1 - x_1} \right)^{-\frac{1+x_1}{2x_1}};$$

$$t_H = \frac{R_3 C (1 - x_1^2)}{4x_1} \ln \frac{1 + x_1}{1 - x_1}, \quad (40)$$

где $x_1 = \sqrt{1 - \frac{4L_3}{R_3^2 C}}$.

Для периодического режима ($R_3 < 2 \sqrt{L_3/C}$) ток разряда

$$i = - \frac{U_C}{\omega' L_3} R_3^{-\beta t} \sin \omega' t,$$

где $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.

Максимальное значение тока и время его нарастания определяются выражениями

$$I_{\max} = U_C \sqrt{\frac{C}{L_3}} e^{-\frac{\arctg x_2}{x_2}};$$

$$t_H = \frac{2L_3}{R_3 x_2} \arctg x_2, \quad (41)$$

где $x_2 = \sqrt{\frac{4L_3}{R_3^2 C} - 1}$.

В критическом режиме ($R_3 = 2\sqrt{L_3/C}$) соответственно

$$i = -\frac{U_C}{L_3} t e^{-\beta t}; \quad I_{\max} = 0,735 \frac{U_C}{R_3};$$

$$t_n = \frac{2L_3}{R_3}. \quad (42)$$

Эквивалентные параметры импульсной цепи определяют сопротивлением и индуктивностью намагничивающих катушек R_K и L_K , подводящих проводов $R_{пр}$ и $L_{пр}$ и сопротивлением управляемого вентиля R_B :

$$R_3 = R_K + R_{пр} + R_B; \quad L_3 = L_K + L_{пр}. \quad (43)$$

Определение эквивалентного активного сопротивления при расчете схемы затруднительно, так как при этом приходится оценивать изменение сопротивления за счет нагрева, которое происходит в момент разряда. Полагая, что плотность тока в проводниках схемы значительно меньше, чем в намагничивающих катушках, нагревом проводников схемы можно пренебречь. Средняя температура перегрева намагничивающих катушек является функцией плотности тока и частоты разрядов импульсного устройства и в каждом отдельном случае может быть определена с учетом реальных условий работы устройства.

Для выяснения влияния каждого из трех параметров — емкости, индуктивности и активного сопротивления — на максимальное значение тока разряда и длительность его нарастания были проанализированы случаи, когда два параметра остаются постоянными, а третий является величиной переменной. При этом за исходные условия в каждом отдельном случае были приняты соотношения между емкостью, индуктивностью и активным сопротивлением, обеспечивающие получение критического режима разряда ($R_3 = 2\sqrt{L_3/C}$). Ниже приводятся аналитические выражения, позволяющие выяснить характер относительного изменения максимального тока импульса

$I/I_{кр}$ и времени его нарастания $t/t_{кр}$ при изменении указанных параметров.

1. Для случая $C = \text{const}$ и $L_3 = \text{const}$ эквивалентное сопротивление цепи можно представить как $R_3 = 2k\sqrt{L_3/C}$, где k — коэффициент, показывающий, во сколько раз сопротивление R_3 отличается от его значения, соответствующего критическому режиму. Условие $k > 1$ соответствует аperiодическому и $k < 1$ — периодическому режиму. Используя расчетные выражения (40) — (42), при $k > 1$ получим:

$$\frac{I_{k>1}}{I_{k=1}} = 2,72 \frac{1}{k(1-x_1)} \left(\frac{1+x_1}{1-x_1} \right)^{-\frac{1+x_1}{2x_1}} ;$$

$$\frac{t_{k>1}}{t_{k=1}} = \frac{k(1-x_1^2)}{2x_1} \ln \frac{1+x_1}{1-x_1}, \quad (44)$$

где $x_1 = \sqrt{1-1/k^2}$.

При $k < 1$

$$\frac{I_{k<1}}{I_{k=1}} = 2,72e^{-\frac{\text{arctg } x_2}{x_2}} ;$$

$$\frac{t_{k<1}}{t_{k=1}} = \frac{1}{kx_2} \text{arctg } x_2, \quad (45)$$

где $x_2 = \sqrt{1/k^2 - 1}$.

2. Для случая $L_3 = \text{const}$ и $R_3 = \text{const}$ $C = 4kL_3/R_3^2$, где коэффициент k показывает, во сколько раз емкость C отличается от значения, соответствующего критическому режиму.

При $k > 1$ в этом случае

$$\begin{aligned} \frac{I_{k>1}}{I_{k=1}} &= 2,72 \frac{1}{1-x_1} \left(\frac{1+x_1}{1-x_1} \right)^{-\frac{1+x_1}{2x_1}}; \\ \frac{t_{k>1}}{t_{k=1}} &= \frac{k(1-x_1^2)}{2x_1} \ln \frac{1+x_1}{1-x_1}, \end{aligned} \quad (46)$$

где $x_1 = \sqrt{1-1/k}$.

При $k < 1$ соответственно

$$\begin{aligned} \frac{I_{k<1}}{I_{k=1}} &= 2,72 \sqrt{ke}^{-\frac{\arctg x_2}{x_2}}; \\ \frac{t_{k<1}}{t_{k=1}} &= \frac{1}{x_2} \arctg x_2, \end{aligned} \quad (47)$$

где $x_2 = \sqrt{1/k-1}$.

В последнем случае при $C = \text{const}$ и $R_0 = \text{const}$ эквивалентную индуктивность по аналогии можно представить как $L_0 = kR_0^2 C/4$. В этом случае коэффициент k показывает, во сколько раз величина индуктивности отличается от ее критического значения. В отличие от двух предыдущих случаев здесь $k > 1$ соответствует периодическому и $k < 1$ — аперiodическому режимам.

При $k < 1$ имеем

$$\begin{aligned} \frac{I_{k<1}}{I_{k=1}} &= 2,72 \frac{1}{1-x_1} \left(\frac{1+x_1}{1-x_1} \right)^{-\frac{1+x_1}{2x_1}}; \\ \frac{t_{k<1}}{t_{k=1}} &= \frac{1-x_1^2}{2x_1} \ln \frac{1+x_1}{1-x_1}, \end{aligned} \quad (48)$$

где $x_1 = \sqrt{1-k}$.

При $k > 1$ соответственно

$$\frac{I_{k>1}}{I_{k=1}} = 2,72 \frac{1}{\sqrt{k}} e^{-\frac{\operatorname{arctg} x_2}{x_2}}; \quad (49)$$

$$\frac{t_{k>1}}{t_{k=1}} = \frac{k}{x_2} \operatorname{arctg} x_2,$$

где $x_2 = \sqrt{k-1}$,

На рис. 32 показаны зависимости $I/I_{k=1} = f(k)$ и $t/t_{k=1} = f(k)$, определенные расчетным путем на основании выражений (44) — (49) для всех рассмотренных случаев. Кривые 1 представляют собой зависимости $t/t_{кр} = f(k)$, а кривые 2 — зависимости $I/I_{кр} = f(k)$. Эти графики наглядно характеризуют степень влияния параметров C , L_3 и R_3 на величину максимального тока разряда и время его нарастания. Из анализа графиков следует, что изменение индуктивности при постоянных значениях емкости и активного сопротивления влияет, главным образом, на

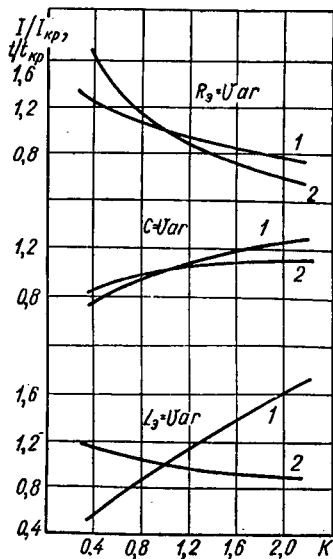


Рис. 32. Графики зависимости амплитуды (2) и длительности (1) разрядного импульса от параметров цепи R_3 , C и L_3 , если один из них изменяется, а два других постоянные.

длительность процесса, лишь незначительно изменяя величину тока разряда. Так, например, увеличение индуктивности вдвое (от $k = 1$ до $k = 2$) приводит к снижению тока примерно на 10%; при этом время его нарастания

увеличивается на 60%. Это обстоятельство может быть использовано в тех случаях, когда необходимо получить максимальную длительность процесса.

Увеличение активного сопротивления вызывает значительное снижение величины тока. Так, при увеличении сопротивления в два раза величина тока снижается примерно на 40%, а время его нарастания на 20%. В связи с этим при выборе элементов цепи следует стремиться к снижению ее активного сопротивления.

Увеличение емкости батареи, как видно из графика, незначительно увеличивает ток и в несколько большей степени влияет на время разряда. Поэтому при расчете цепи не следует стремиться к чрезмерному увеличению емкости батареи.

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНЫХ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

При анализе импульсных намагничивающих цепей с емкостными накопителями рассматривались случаи, когда режим работы цепи изменялся при изменении одного из трех ее параметров — емкости, индуктивности или активного сопротивления при условии постоянства двух других.

На практике возможны случаи одновременного изменения индуктивности и активного сопротивления цепи. Подобная задача возникает при решении вопроса о выборе оптимальных параметров намагничивающей цепи, обеспечивающих создание в заданном объеме напряженности поля определенной величины. Так как обычно конфигурация и основные габаритные размеры намагничивающей обмотки задаются размерами испытуемых образцов и конструктивными параметрами устройства, эта задача сводится к выбору режима работы цепи, определению количества витков намагничивающей обмотки и емкости батареи конденсаторов, позволяющих получить необходимое число ампер-

витков при достаточной длительности действия намагничивающего поля.

Рассмотрим задачу выбора параметров намагничивающей цепи с точки зрения получения максимального количества ампер-витков. При этом будем считать, что влияние магнитопровода на эквивалентные индуктивность и сопротивление цепи мало. В большинстве существующих устройств, использующих импульсные поля, намагничивающая обмотка состоит из двух идентичных, последовательно соединенных секций (рис. 33) круглой формы. Индуктивность и активное сопротивление намагничивающих катушек в этом случае можно определить по формулам

$$L_{\kappa} = b_1 \omega^2; \quad R_{\kappa} = b_2 \omega^2, \quad (50)$$

где ω — число витков намагничивающих катушек; b_1 и b_2 — коэффициенты, величина которых для данной конфигурации и геометрических размеров намагничивающих катушек является постоянной.

С учетом выражения (43), пренебрегая индуктивностью подводящих проводов для эквивалентной индуктивности и активного сопротивления импульсной цепи, можно записать:

$$\begin{aligned} L_{\Sigma} &= b_1 \omega^2; \\ R_{\Sigma} &= b_2 \omega^2 + R_{\text{доб}}, \end{aligned} \quad (51)$$

где $R_{\text{доб}}$ — сопротивление монтажных проводов и разрядного вентиля.

Для дальнейшего анализа различных режимов работы принимаем, что добавочное сопротивление связано с сопротивлением намагничивающих катушек соотношением

$$R_{\text{доб}} = k, b_2 \omega_{\text{кр}}^2, \quad (52)$$

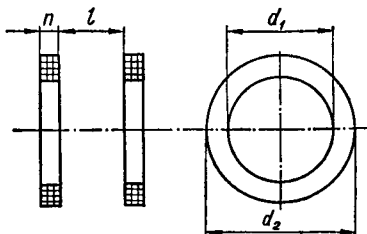


Рис. 33. Импульсные намагничивающие катушки.

где $\omega_{кр}$ — число витков намагничивающих катушек, соответствующее критическому режиму; k_r — коэффициент, учитывающий соотношение между добавочным сопротивлением цепи и сопротивлением намагничивающих катушек при критическом режиме работы.

Учитывая соотношения (51), (52) и расчетные выражения (44) — (49) для определения максимальной намагничивающей силы, времени нарастания тока и числа витков намагничивающей обмотки при работе в критическом режиме ($R_3 = 2 \sqrt{L_3/C}$), получаем

$$\begin{aligned} (I\omega)_{кр} &= 0,368U_c \sqrt{C/b_1}; \\ t_{нкр} &= 2b_1/[b_2(1+k_r)]; \\ \omega_{кр} &= \frac{2}{b_2(1+k_r)} \sqrt{\frac{b_1}{C}}. \end{aligned} \quad (53)$$

При работе в апериодическом и периодическом режимах эквивалентные параметры цепи могут быть определены выражениями

$$\begin{aligned} L_3 &= b_1 k_w^2 \omega_{кр}^2; \\ R_3 &= b_2 \omega_{кр}^2 (k_w^2 + k_r), \end{aligned} \quad (54)$$

где $k_w = \omega/\omega_{кр}$ — коэффициент, показывающий, во сколько раз число витков намагничивающих катушек отличается от значения, соответствующего критическому режиму работы.

С учетом выражения (54) условие работы схемы в апериодическом режиме $R > 2 \sqrt{L_3/C}$ принимает вид $\frac{(k_w^2 + k_r)}{(1 + k_r)} > k_w$, а расчетные выражения могут быть представлены следующим образом:

$$I\omega = \frac{U_c k_w (1 + k_r)}{(k_w^2 + k_r) (1 - x_1)} \sqrt{\frac{C}{b_1}} \left(\frac{1 + x_1}{1 - x_1} \right)^{-\frac{1+x_1}{2x_1}};$$

$$t_n = \frac{b_1 (k_w^2 + k_r) (1 - x_1^2)}{b_2 (1 + k_r)^2 x_1} \ln \frac{1 + x_1}{1 - x_1}, \quad (55)$$

$$\text{где } x_1 = \frac{k_w^2 - k_r}{k_w^2 + k_r} \sqrt{k_w^2 - 1}.$$

Для периодического режима соответственно $\frac{k_w^2 + k_r}{1 + k_r} < < k_w$, а расчетные выражения принимают вид:

$$I\omega = U_C \sqrt{\frac{C}{b_1}} e^{-\frac{\arctg x_2}{x_2}};$$

$$t_n = \frac{2b_1 k_w^2}{b_2 (k_w^2 + k_r) x_2} \arctg x_2, \quad (56)$$

$$\text{где } x_2 = \frac{k_w^2 - k_r}{k_w^2 + k_r} \sqrt{1 - k_w^2}.$$

Полученные выражения (53), (55) и (56) позволяют рассчитать намагничивающую силу и время нарастания тока для различных режимов работы схемы. Для более наглядного представления зависимости $I\omega$ и t_n от параметров намагничивающих катушек перейдем к безразмерным величинам, тогда для аperiodического режима можно записать:

$$\frac{I\omega}{(I\omega)_{\text{кр}}} = 2,72 \frac{k_w (1 + k_r)}{(k_w^2 + k_r) (1 - x_1)} \left(\frac{1 + x_1}{1 - x_1} \right)^{-\frac{1+x_1}{2x_1}};$$

$$\frac{t}{t_{\text{кр}}} = \frac{(k_w^2 + k_r) (1 - x_1^2)}{2 (1 + k_r) x_1} \ln \frac{1 + x_1}{1 - x_1}. \quad (57)$$

Для периодического режима аналогичные выражения принимают вид:

$$\frac{I\omega}{(I\omega)_{\text{кр}}} = 2,72 e^{-\frac{\arctg x_2}{x_2}};$$

$$\frac{t}{t_{\text{кр}}} = \frac{k_w^2 (1 + k_r)}{(k_w^2 + k_r) x_2} \arctg x_2. \quad (58)$$

На рис. 34 графически показаны зависимости $I\omega/(I\omega)_{кр} = f(k_w)$ и $t/t_{кр} = f(k_w)$ для значений коэффициента k_r , равных 0,5; 0,2 и 0,1 (кривые 1, 2 и 3 соответственно). Из этих графиков следует, что в соответствии с принятыми исходными условиями произведение $I\omega$ возрастает с уменьшением

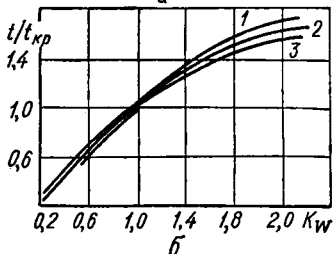
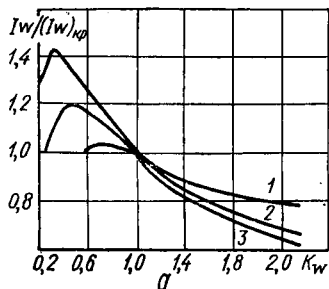


Рис. 34. Графики зависимости намагничивающей силы (а) и времени нарастания тока разряда (б) от параметров импульсной цепи:

1— $k_r = 0,5$; 2— $k_r = 0,2$; 3— $k_r = 0,1$.

числа витков намагничивающей обмотки и при определенном его значении, зависящем от коэффициента k_r , достигает максимума.

Определим условия, при которых это возможно. Из выражения (58) видно, что максимальное значение $I\omega$ будет получено при максимуме функции

$e^{-\frac{\text{arctg } x_2}{x_2}}$. Последнее, в свою очередь, обеспечивает при максимальном значении x_2 , так как при его возрастании функция $\text{arctg } x_2/x_2$ монотонно убывает. Анализируя из выражений (56) зависимость $x_2 = f(k_r, k_w)$ на максимум, находим искомые условия в виде $k_w = \sqrt{k_r}$, что соответствует количеству витков намагничивающей обмотки и значению x_2 , определяемым выражениями

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{R_{\text{доб}}}{b_2}}; \quad x_{2\max} = \sqrt{\frac{b_1}{R_{\text{доб}} b_2 C}} - 1. \quad (59)$$

Длительность процесса, как видно из кривых на рис. 34, мало зависит от значения коэффициента k_r и с уменьше-

нием числа витков намагничивающей обмотки заметно снижается.

Полученные результаты позволяют выбрать оптимальные параметры намагничивающей цепи. Исходными при таком расчете являются конфигурация и габаритные размеры n , l , d_1 и d_2 (рис. 33) импульсных катушек, значение напряженности намагничивающего поля и длительность импульса. Эти данные позволяют определить необходимое количество намагничивающих ампер-витков катушек $(I\omega)_{\text{расч}}$ и значения коэффициентов b_1 и b_2 . Для этого используются расчетные выражения, устанавливающие связь между геометрическими размерами намагничивающих катушек, напряженностью создаваемого ими магнитного поля, их индуктивностью и активным сопротивлением [27].

Задаваясь ориентировочной величиной намагничивающего тока I_{max} и падением напряжения на управляемом вентиле, а также длиной и сечением монтажных проводов, определяем значение добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$. На основании выражения (59) находим количество витков намагничивающей обмотки ω_{max} , соответствующее условию получения максимальных ампер-витков. Сравним полученные величины с исходным количеством ампер-витков. Если условие $(I\omega)_{\text{расч}} \approx I_{\text{max}} \omega_{\text{max}}$ не выполняется, т. е. ориентировочная величина намагничивающего тока была выбрана недостаточно точно, необходимо скорректировать значения $R_{\text{доб}}$ и определить уточненное количество витков намагничивающей обмотки. На основании выражений (50) находим индуктивность и активное сопротивление намагничивающей обмотки, а исходя из ее геометрических размеров и количества витков, находим сечение и выбираем обмоточный провод.

В результате дальнейшего расчета определяем емкость батареи конденсаторов. Для этого выбираем их тип и задаемся величиной напряжения U_C , из выражений (56) и (59) определяем зависимость $I\omega = f(C)$, задаваясь определенной величиной $(I\omega)_{\text{расч}}$, находим емкость батареи C .

В заключение расчета необходимо произвести проверку выбранного режима работы схемы на соответствие заданной длительности импульса. В случае, если длительность импульса исходными условиями не оговаривается, ее необходимая величина $t_{\text{имп}}$ может быть определена, исходя из геометрических размеров и свойств материала намагничиваемых постоянных магнитов на основании известного эмпирического соотношения [36]

$$t_{\text{имп}} = 6,4\sigma \frac{B}{H} d_{\text{м}} 10^{-9},$$

где B — индукция в магните, Т; H — напряженность намагничивающего поля, кА/м; σ — удельная проводимость материала магнита, Ом⁻¹ м⁻¹; $d_{\text{м}}$ — эффективный диаметр магнита, м.

Из выражения (56) для выбранных параметров схемы определяем время нарастания тока $t_{\text{н}}$. Ввиду крутого фронта волны эта величина связана с длительностью импульса соотношением $t_{\text{н}} = (0,3 \dots 0,45) t_{\text{имп}}$, которое позволяет осуществить указанную проверку.

Если полученная длительность импульса не соответствует необходимой, следует скорректировать расчет. Увеличение длительности при этом может быть получено за счет соответствующего увеличения емкости батареи. В отдельных случаях, при значительном несоответствии полученной и необходимой длительности, можно увеличить число витков намагничивающей обмотки. Последнее крайне нежелательно, так как при этом нарушаются условия получения максимальной намагничивающей силы. При проведении указанной корректировки для обеспечения большей наглядности удобно пользоваться графиками (рис. 34) и использовать приведенные выше расчетные выражения.

3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ ПИТАНИЕМ ОТ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Характерной особенностью импульсных намагничивающих устройств с непосредственным питанием от сети переменного напряжения, как отмечалось, является возможность возникновения во вторичной цепи обратного импульса тока, приводящего к появлению размагничивающего поля в рабочем зазоре намагничивающей системы.

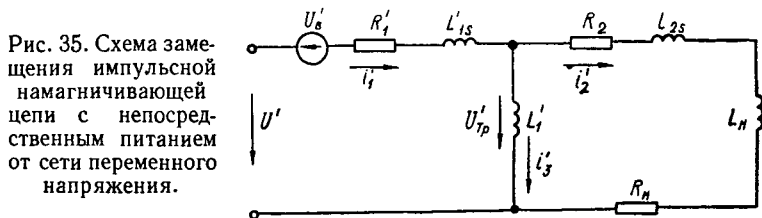


Рис. 35. Схема замещения импульсной намагничивающей цепи с непосредственным питанием от сети переменного напряжения.

Появление такого обратного импульса связано с наличием в схеме устройства (см. рис. 25) импульсного понижающего трансформатора, параметры которого (и режим работы устройства) оказывают значительное влияние на величину этого обратного выброса. Для более подробного выяснения влияния указанных факторов на величину обратного импульса и определения оптимальных, с точки зрения снижения этого импульса, условий работы были рассмотрены процессы, происходящие в намагничивающем устройстве с непосредственным питанием от сети переменного напряжения и с понижающим трансформатором [5]. Исследовались максимальные значения первичного i_1 и вторичного i_2 токов, индукции в магнитопроводах трансформатора B_{Tp} и нагрузки B_n , а также значения индукции в сердечнике трансформатора $B_{Tpк}$ и вторичного тока $i_{2к}$ в момент выключения тиристора. В ходе исследования изучалась зависимость перечисленных параметров от изменения активного

сопротивления, индуктивности нагрузки и от угла зажигания тиристора.

На рис. 35 изображена приведенная ко вторичной обмотке, имеющей один виток ($\omega_2 = 1$), схема замещения, где R_2 и L_{2s} — активное сопротивление и индуктивность рассеяния вторичной обмотки; R_n и L_n — активное сопротивление и индуктивность нагрузки; $R'_1 = R_1/\omega_1^2$ и $L'_{1s} = L_{1s}/\omega_1^2$ — приведенные активное сопротивление и индуктивность рассеяния первичной обмотки; $L'_1 = L_1/\omega_1^2$ — приведенная индуктивность первичной обмотки; $i'_1 = i_1\omega_1$ — приведенный ток первичной обмотки; $i'_3 = i'_1 - i_2$ — полный ток трансформатора; $U' = U/\omega_1$ и $U'_b = U_b/\omega_1$ — приведенные входное напряжение и падение напряжения на тиристоре. Схема замещения не учитывает потери в сердечнике трансформатора и нагрузочном контуре.

Для вторичного контура справедливо уравнение

$$U'_{\text{тр}} = L_{2н} \frac{di_2}{dt} + i_2 R_{2н}, \quad (60)$$

где $U'_{\text{тр}}$ — трансформируемое напряжение; i_2 — ток вторичной обмотки; $R_{2н} = R_2 + R_n$ — активное сопротивление вторичного контура; $L_{2н} = L_{2s} + L_n$ — индуктивность вторичного контура.

Из уравнения (60) получаем

$$i_2 = \left(\int U'_{\text{тр}} dt - R_{2н} \int i_2 dt \right) / L_{2н}.$$

Полный ток

$$i_3 = \int U'_{\text{тр}} dt / L'_1,$$

тогда приведенный ток первичной обмотки

$$i'_1 = i'_3 + i_2 = \int U'_{\text{тр}} dt / L'_1 + \left(\int U'_{\text{тр}} dt - R_{2н} \int i_2 dt \right) / L_{2н}. \quad (61)$$

Когда ток i_2 достигает нулевого значения, выполняется равенство $\int U'_{\text{тр}} dt = R_{2н} \int i_2 dt$.

Интеграл $\int U'_{\text{тр}} dt$ равен магнитному потоку Φ сердечника трансформатора, а интеграл $\int i_2 dt$ — заряду Q_2 цепи вторичной обмотки. Учитывая, что ток i_2 до этого был больше нуля, т. е. $\Phi = R_{2н} Q_2 > 0$, в момент равенства нулю тока i_2 для приведенного тока в первичной обмотке трансформатора получим

$$i'_1|_{i_2=0} = \Phi/L'_1. \quad (62)$$

Из этого выражения следует, что в момент прекращения положительного тока через вторичную обмотку в первичной обмотке еще протекает ток i'_1 . Этот ток обращается в нуль при выполнении равенства $i'_3 = -i_2$, тогда из выражения (61) находим

$$\left(\frac{1}{L'_1} + \frac{1}{L_{2н}} \right) \int U'_{\text{тр}} dt = \frac{1}{\tau} \int i_2 dt, \quad (63)$$

где $\tau = L_{2н}/R_{2н}$ — постоянная времени вторичного контура.

Из рассмотрения уравнений (62) и (63) можно заключить, что магнитная энергия, запасенная в трансформаторе при протекании тока i'_1 , порождает обратный ток через вторичную обмотку трансформатора, обуславливая появление размагничивающего поля в зазоре намагничивающего устройства. Величиной, характеризующей степень размагничивания, является индукция в сердечнике трансформатора $B_{\text{трк}}$ в момент равенства нулю тока в первичной обмотке. Для подтверждения указанных положений процессы, происходящие в намагничивающей установке с понижающим трансформатором, изучались на моделирующей машине. При составлении наборной схемы решения задачи были приняты упрощающие допущения, в результате которых схема решения приводится к линейной и, таким образом, не учитывает нелинейности индуктивности трансформатора L'_1 и

нагрузки $L_{2н}$. Такое допущение правомерно в том случае, если схема работает в режиме, не допускающем насыщения сердечников трансформатора и нагрузки, что имеет место в реальных устройствах.

Так как индуктивности L_1' и $L_{2н}$, имеющие ферромагнитные сердечники, могут изменяться во время импульса и,

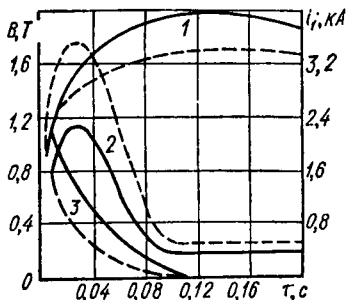


Рис. 36. График зависимости индукции в магнитопроводе нагрузки (1), тока в первичной обмотке трансформатора (2) и индукции в сердечнике трансформатора в момент выключения тиристора (3) от постоянной времени вторичного контура.

кроме того, активное сопротивление и индуктивность нагрузки изменяются при намагничивании различных магнитов, на аналоговой машине исследовалось несколько вариантов, отличающихся друг от друга величиной параметров $R_{2н}$ и $L_{2н}$. Последние изменялись в пределах от 10 до 40 мкОм и от 0,2 до 2,0 мкГ, что соответствует значениям этих величин в реальных схемах. При этом индуктивность L_1' принималась неизменной, так как трансформатор работает в режиме, далеком от насыщения. Величина L_1' была принята равной 16,5 мкГ. Для обеспечения необходимого ре-

жима работы трансформатора число витков первичной обмотки выбиралось, исходя из того, чтобы индукция в магнитопроводе трансформатора равнялась около 1,6 Т.

На рис. 36 изображены графики зависимости индукции B_n в магнитопроводе нагрузки (кривые 1), индукции $B_{трк}$ в сердечнике трансформатора в момент выключения тиристора (кривые 3) и тока i_1 в первичной обмотке трансформатора (кривые 2) при двух значениях угла зажигания тиристора $\psi = 0^\circ$ — сплошные линии и $\psi = 90^\circ$ — пунктирные ли-

нии) в зависимости от изменения постоянной времени вторичного контура τ . Аналогичная зависимость тока i_2 на графике не приведена, так как она повторяет ход кривой тока i_1 .

Из графиков следует, что при увеличении угла зажигания тиристором не происходит каких-либо существенных изменений исследуемых параметров, в то же время при изменении постоянной времени вторичного контура указанные параметры значительно изменяются. Так, при значениях τ , меньших 0,1 с, индукция в нагрузке и, в конечном итоге, в рабочем зазоре магнитной системы значительно ниже индукции при $\tau \geq 0,1$ с. Величина индукции $B_{\text{трк}}$, порождающей в рабочем зазоре размагничивающее поле, достигает при этом значительной величины. Зависимость тока в первичной обмотке трансформатора от постоянной времени имеет четко выраженный максимум при 0,02 с, что соответствует частоте питающего напряжения; т. е. при постоянной времени цепи нагрузки, равной периоду питающего напряжения, потребляемый ток резко возрастает. Величина индукции размагничивающего поля, обусловленная обратным током, минимальна при $\tau \geq 0,1$ с и резко увеличивается с уменьшением постоянной времени. Время действия размагничивающего поля определяется постоянной времени цепи вторичного контура после запираания тиристора. Выражение для обратного тока в этом случае имеет вид

$$i_{2\text{обр}} = i_{2\text{к}} e^{-t/\tau_1},$$

где $\tau_1 = (L_{2\text{н}} + L_1)/R_{2\text{н}}$. Величина τ_1 значительно превышает длительность импульса намагничивания и составляет 1—2 с. Проведенные исследования показали, что в намагничивающем устройстве при неудачном выборе его параметров действительно возможно возникновение достаточно сильного размагничивающего поля. Величина этого поля существенно зависит от соотношения индуктивности и активного сопротивления вторичного контура и при их рациональном

выборе может быть значительно уменьшена. Это условие совпадает с условием получения максимального намагничивающего поля и минимальной потребляемой мощности, что позволяет осуществить этот режим в практически действующих устройствах.

Глава VII

УСТРОЙСТВА С НЕПОЛНОСТЬЮ ЗАМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

1. АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Коэрцитивная сила H_c , в частности, коэрцитивная сила по намагниченности, является параметром, наиболее чувствительным к различным структурным изменениям свойств материала, возникающим при различных нарушениях технологических режимов производства постоянных магнитов, и, одновременно с этим, наиболее удобным для измерения в условиях производства. Последнее определяется тем, что коэрцитивная сила по намагниченности, в отличие от всех остальных параметров магнитотвердых материалов, без дополнительной коррекции выходных сигналов измерительных преобразователей может определяться в устройствах с незамкнутой магнитной системой; причем результат измерения мало зависит от изменения геометрических размеров испытываемых образцов. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность определения коэрцитивной силы на механически необработанных постоянных магнитах, а также постоянных магнитах достаточно сложной формы.

Рассмотрим аналоговые устройства для определения

коэрцитивной силы постоянных магнитов по намагниченности. Функциональная схема аналогового коэрцитиметра с неполностью замкнутой магнитной системой, разработанного в Институте электродинамики АН УССР [11, 50], показана на рис. 37. Испытуемый постоянный магнит 3

располагается симметрично в межполюсном пространстве магнитной системы 2 с фиксированным воздушным зазором. У одного из концов магнита находится чувствительный элемент индикатора намагниченности 5, а у нейтрали магнита — измеритель напряженности поля 6. В качестве чувствительных элементов используются преобразователи Холла, на выходе которых включены стрелочные измерительные приборы 7 и 8. Питание коэрцитиметра осуществляется от сети переменного тока через преобразовательное устройство 1.

В коэрцитиметре применен комбинированный способ намагничивания, при котором на постоянное поле, создаваемое катушками магнитной системы 9, накладывается импульсное поле, возникающее в момент разряда батареи конденсаторов. Для максимального использования энергии конденсаторов импульсные катушки 4 вынесены в межполюсное пространство и находятся в непосредственной близости от испытуемого магнита. Для размагничивания используются катушки магнитной системы 9, через которые пропускают ток противоположной по отношению к намагничивающему току полярности и плавно увеличивают его до тех пор, пока стрелка индикатора намагниченности

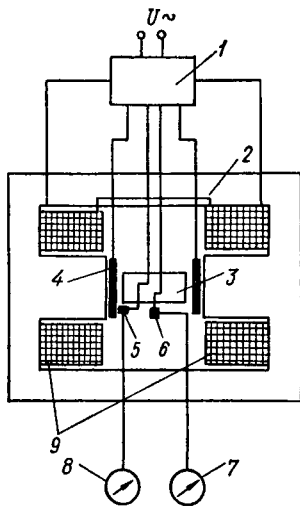


Рис. 37. Функциональная схема аналогового коэрцитиметра с неполностью замкнутой магнитной системой.

δ не остановится на нуле. Величину напряженности размагничивающего поля, при которой намагниченность магнита

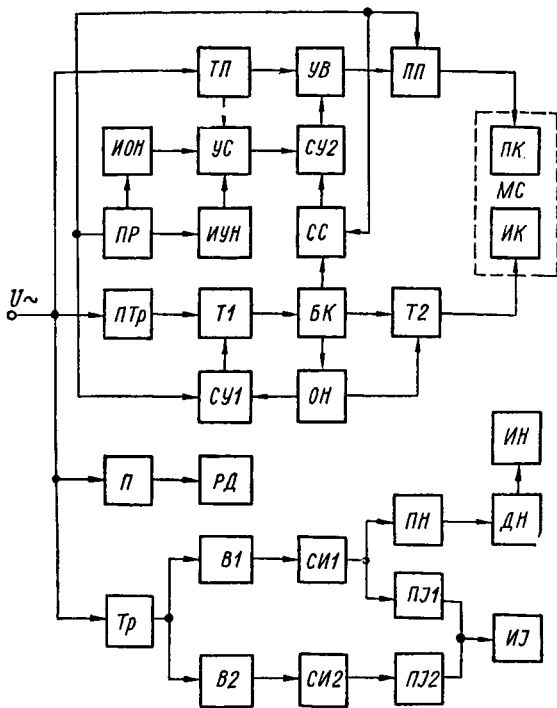


Рис. 38. Структурная схема коэрцитиметра с автоматическим процессом намагничивания и ручным управлением размагничивающим током.

равна нулю, принимают за коэрцитивную силу, а ее значение отсчитывают по прибору 7.

Описанная функциональная схема положена в основу аналоговых коэрцитиметров с ручным управлением намагничивающим и размагничивающим током и с автоматическим

намагничиванием и ручным управлением размагничивающим током. Структурная схема последнего изображена на рис. 38. В этом устройстве использованы тиристорные источники питания. В сочетании с импульсными катушками *ИК* и катушками постоянного тока *ПК* они позволяют получать комбинированные намагничивающие поля, постоянные размагничивающие поля со стабилизацией и ручной регулировкой их напряженности и постоянные поля с заданным значением напряженности, используемые при контроле калибровки измерителя коэрцитивной силы.

Схема импульсного намагничивания коэрцитиметра построена по принципу ограничения напряжения батареи конденсаторов *БК* при питании зарядных цепей повышенным напряжением. Совместная работа схем импульсного и постоянного намагничивания обеспечивается схемой синхронизации *СС*. Стабилизация и управление постоянным током в режимах измерения и контроля выполняется источниками управляемого *ИУН* и опорного *ИОН* напряжения совместно с токовым преобразователем *ТП*. Выходные напряжения этих источников сравниваются с напряжением *ТП* и подаются в схему управления *СУ2*.

Измерение напряженности размагничивающего поля и индикация намагниченности испытуемого магнита производятся с помощью трех измерительных преобразователей Холла *ПН*, *ПН1* и *ПН2* и выходных измерительных приборов *ИН* и *ИЖ*. Питание токовых цепей измерительных преобразователей осуществляется от понижающего трансформатора *Тр*, выпрямителей *В1* и *В2* и стабилизированных источников тока *СИ1* и *СИ2*. Изменение пределов измерения и корректировка выходного напряжения преобразователя напряженности размагничивающего поля (при контроле его калибровки) выполняется с помощью делителя напряжения *ДН*. Переключатель *П* совместно с реверсивным двигателем *РД* служат для автоматического перемещения зажимных щечек измерительного столика в процессе установки и снятия испытуемых магнитов. Управление работой

коэрцитиметра и переключение его схемы в режимы намагничивания, измерения и контроля выполняются с помощью переключателя режимов работы *ПР*, который состоит из трехпозиционного переключателя, режимных исполнительных реле и пусковой кнопки.

Внешний вид описываемых аналоговых коэрцитиметров показан на рис. 39. Основные узлы устройства — стол управления, магнитная система, измерительный столик и преобразовательное устройство.



Рис. 39. Внешний вид аналогового коэрцитиметра с полностью замкнутой магнитной системой.

Магнитная система коэрцитиметра, представляющая собой магнитопровод с фиксированным воздушным зазором, размещается на крышке стола управления. В межполюсном пространстве магнитной системы установлен измерительный столик, на котором расположены определенным образом испытуемые магниты, измерительные преобразователи и намагничивающие импульсные катушки. Зажимные щечки столика, приводимые в движение реверсивным двигателем, устанавлива-

ют испытуемые магниты симметрично относительно полюсов магнитной системы. Импульсные намагничивающие катушки расположены в пазах неподвижных щечек измерительного столика. Элементы преобразовательного устройства смонтированы на панели, прикрепленной к задним ножкам стола управления и защищены кожухом, закрывающим доступ к токоведущим частям схемы. Стол соединяет основные узлы коэрцитиметра в единое целое, а его крышка служит панелью управления, на которой расположены рукоятки регулировки напряженности размагничивающего поля, переключателей режимов работы, управления реверсивным двигателем измерительного столика и измерительные прибо-

ры индикатора намагниченности и измерителя коэрцитивной силы.

Рассмотренные аналоговые коэрцитиметры предназначены для определения коэрцитивной силы по намагниченности постоянных магнитов из литых магнитотвердых материалов. Коэрцитиметры имеют два предела измерения (75 и 150 кА/м) и обеспечивают возможность испытания постоянных магнитов длиной 20—80 мм, сечением 1—16 см². Испытуемые магниты должны иметь такую геометрическую форму, чтобы при расположении их на измерительном столе в непосредственной близости от измерительных преобразователей находилось тело магнита без конструктивных или технологических пустот и включений. Время измерения не превышает 1 мин, питание коэрцитиметров осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В. Максимальная мощность, потребляемая от питающей сети в момент намагничивания, не превышает 5 кВА.

Анализ факторов, влияющих на точность измерения параметров магнитотвердых материалов, показал, что при определении коэрцитивной силы по намагниченности в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой, кроме погрешности измерения напряженности размагничивающего поля и погрешности за счет нечувствительности нулевого индикатора намагниченности, необходимо также учитывать влияние неоднородной намагниченности испытуемых магнитов, недоведение их материала до насыщения, влияние магнитной вязкости и неоднородности магнитных свойств материала и неоднородности внешнего размагничивающего поля. Полагая, что погрешность измерения напряженности размагничивающего поля при использовании выходных измерительных приборов класса 0,5 не превышает 2%, а погрешность за счет нечувствительности нулевого индикатора соответственно 0,4%, суммарная среднеквадратичная погрешность измерения коэрцитивной силы (с учетом влияния указанных выше факторов) в рассматриваемых устройствах составляет 2,5%. При оценке суммарной

погрешности измерения принималось, что погрешность за счет влияния неоднородной намагниченности испытуемых магнитов и неоднородности внешнего магнитного поля не превышает 0,8%. Погрешность за счет недоведения материала испытуемых магнитов до насыщения не учитывалась, так как суммарное намагничивающее поле, используемое в коэрцитиметре, более чем в 3,5 раза превышает значение измеряемой коэрцитивной силы. Погрешность за счет влияния магнитной вязкости и неоднородности магнитных свойств материала испытуемых магнитов, как показано выше, может достигать 0,5—1,5%. При усреднении результатов измерения эту погрешность можно принять равной 0,2—0,6%.

Определение погрешностей измерения в соответствии с требованиями существующего стандарта [29] проводилось по результатам испытаний стандартных образцов, аттестованных в метрологической организации. За результат измерений в коэрцитиметре при таких испытаниях принималось среднее значение из четырех измерений, выполненных в различных положениях магнита по отношению к измерительным преобразователям. Использование такой методики при оценке погрешностей измерения позволяло исключить влияние неоднородности свойств материала стандартных образцов. Повторяемость результатов измерений проверялась многократным испытанием отдельных магнитов при установке их в одних и тех же положениях относительно измерительных преобразователей. Результаты проведенных испытаний показали, что значения коэрцитивной силы, полученные при измерениях в коэрцитиметре, отличались от паспортных данных не более чем на 2,2%. Максимальные отклонения результатов отдельных измерений от средних значений не превышали 0,5%, а для большинства измерений находились в пределах 0,2%.

Испытания показали, что коэрцитиметры позволяют измерять коэрцитивную силу не только магнитов правильной геометрической формы, но и магнитов более сложных форм

В качестве примера можно назвать магниты, представляющие собой двухполюсные роторы, отлитые с осью или без нее. Полученные значения коэрцитивной силы для образцов этой формы отличаются от действительных значений (измеренных на вырезанных из роторов образцах правильной формы) на 2—7%. Наибольшая погрешность наблюдалась в тех случаях, когда ротор, отлитый без оси, устанавливался на измерительном столике таким образом, что над преобразователем напряженности поля находилось отверстие в теле магнита. Коэрцитиметры обеспечивают возможность определения коэрцитивной силы на образцах материала и готовых магнитах простой формы с погрешностью, не превышающей 3%, что соответствует существующим требованиям к устройствам для измерения магнитных характеристик постоянных магнитов. Кроме того, эти устройства в процессе испытаний дают возможность выявлять неоднородность магнитных свойств материала испытываемых магнитов, что имеет большое значение для отработки технологических режимов и оценки качества готовых изделий.

Аналоговые коэрцитиметры с неполностью замкнутой магнитной системой выпускаются заводом «Точэлектроприбор». Устройства типа У-5030 соответствуют функциональной схеме, изображенной на рис. 37 [24]. В отличие от описанных выше аналоговых коэрцитиметров они имеют автоматическое управление размагничивающим током. Коэрцитиметры предназначены для испытания постоянных магнитов длиной 15—100 мм, сечением 0,5—25 см² с коэрцитивной силой до 100 кА/м. Погрешность измерения не превышает 4%. Конструктивно они также выполнены в виде стенда, объединяющего в единое целое магнитную систему, измерительный столик, измерительную схему и преобразовательное устройство. Измерительный столик в этих коэрцитиметрах не имеет зажимных щечек, а испытываемые магниты устанавливаются с помощью съемных текстолитовых шаблонов. Намагничивание магнитов производится

однополярным импульсом разряда конденсаторной батареи. Импульсные катушки расположены на полюсах магнитной системы.

2. ЦИФРОВЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ

Повышение точности и быстродействия аппаратуры для испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов неразрывно связано с автоматизацией процесса измерения, с разработкой и внедрением в магнитоизмерительную практику цифровых автоматических устройств. Рассмотрим устройства для определения коэрцитивной силы постоянных магнитов из литых материалов и магнитотвердых ферритов [42, 45]. В основу этих устройств положен бескоммутационный метод измерения коэрцитивной силы по намагниченности в непользованной замкнутой магнитной системе. В качестве измерителей напряженности размагничивающего поля и намагниченности, так же, как и в аналоговых коэрцитиметрах, используются гальваномагнитные преобразователи Холла.

Структурная схема цифрового автоматического коэрцитиметра с отдельным процессом намагничивания и измерения и ручным переключением режимов работы показана на рис. 40. Она содержит тиристорный источник питания и цифровую измерительную схему, которые обеспечивают автоматическое выполнение режимов комбинированного намагничивания и измерения, а также дополнительных режимов контроля и ручной регулировки тока в катушках магнитной системы. Измерительная схема устройства — двухканальная система, в которой в качестве источника счетных импульсов используется генератор переменной частоты *ГПЧ*. Его работа управляется разностью напряжений, поступающих от измерительного преобразователя *ПН* и преобразователя тока в напряжение *ПКН*, включенного

на выходе счетчика импульсов СИ. При таком построении схемы основной измерительный канал, включающий, кроме перечисленных элементов, узел сравнения УС2, усилитель

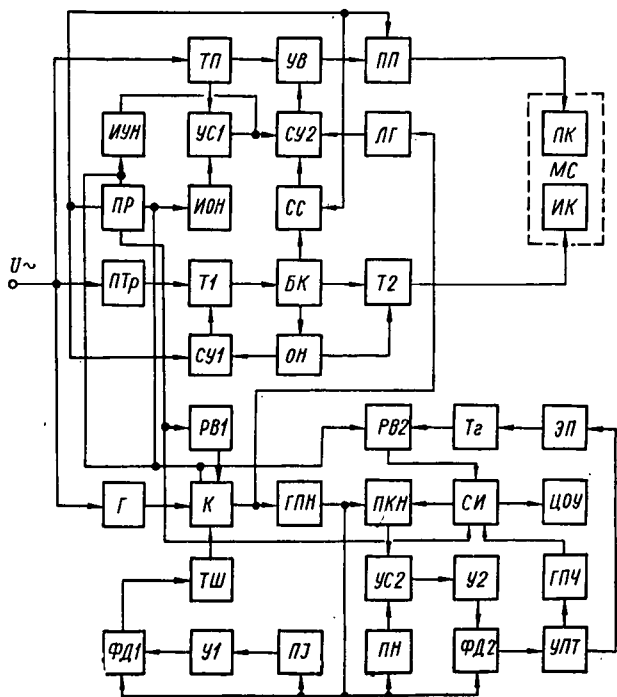


Рис. 40. Структурная схема цифрового автоматического коэрцитиметра с ручным переключением режимов работы.

У2, фазочувствительный детектор ФД2, усилитель постоянного тока УПТ, задающий генератор Г, ключ К и генератор прямоугольного напряжения ГПН, обеспечивает автоматическое измерение напряженности поля и фиксирует с помощью цифрового отсчетного устройства ЦОУ с

значение в тот момент, когда намагниченность магнита достигает нулевого значения.

Процесс измерения начинается с подачи сигнала от переключателя режимов *ПР* на реле времени *РВ1*, которое открывает ключ *К*, что обеспечивает питание основных элементов измерительной схемы. Одновременно с этим подается управляющее напряжение на линейный генератор *ЛГ*, который воздействует на *СУ2* и создает в *ПК* линейно нарастающий размагничивающий ток. Момент фиксации задается с помощью второго канала, включающего *П1*, *У1*, *ФД1* и триггер Шмитта *ТШ*. Этот канал измеряет намагниченность и выполняет роль нуля-органа измерительной схемы. При снижении намагниченности до нуля срабатывает *ТШ* и запирает ключ *К*. *ГПЧ* в этот момент прекращает работу, так как напряжение на его входе падает до нуля, и *ЦОУ* фиксирует значение коэрцитивной силы испытуемого магнита. Ток в *ПК* отключается, так как управляющее напряжение с *ЛГ* снимается.

В режиме контроля в зазоре магнитной системы создается магнитное поле заданной напряженности, которое измеряется измерительной схемой. В случае необходимости производится корректировка коэффициента передачи канала измерения напряженности поля. Ключ *К* в этом режиме открывается и поддерживается в открытом состоянии напряжением, подаваемым на его вход непосредственно с *ПР*. Цепочка на выходе *УПТ*, состоящая из эмиттерного повторителя *ЭП*, триггера *Т2* и реле времени *РВ2*, осуществляет сброс показаний счетчика импульсов с выдержкой 0,5с после окончания измерительного цикла и обеспечивает периодическое повторение процесса измерения.

Разработанная измерительная схема, благодаря наличию замкнутой системы, обладает достаточно высокой точностью, надежностью и обеспечивает необходимое быстродействие. Чтобы уменьшить погрешность измерения, обусловленную нестабильностью напряжения источника питания, измерительные преобразователи и преобразователь кода в напря-

жение питаются от общего источника прямоугольного напряжения. С учетом специфики измерения магнитных характеристик, не допускающей реверсирования в процессе изменения магнитного состояния испытуемых магнитов, использован неререверсивный счетчик импульсов. При построении отсчетного устройства применена стробоскопическая система управления цифровыми лампами с поочередным опросом их катодов [46], в которой за счет импульсного питания ламп значительно улучшается качество их свечения. Применение одних и тех же декадных делителей для счета и хранения результата, а также снятие отсчета в дс-полняющем коде позволяет существенно уменьшить оборудование в системе и количество информационных проводов для связи с цифровыми лампами.

Построенные по описанной структурной схеме цифровые автоматические устройства выполнены в трех модификациях и дают возможность измерять коэрцитивную силу постоянных магнитов следующих типоразмеров: $l = 20 \dots 80$ мм, H_c до 150 кА/м, $s = 0,5 \dots 16$ см²; $l = 18 \dots 50$ мм, H_c до 300 кА/м, $s = 0,5 \dots 16$ см²; $l = 5 \dots 30$ мм, H_c до 400 кА/м, $s = 0,5 \dots 9$ см². Эти диапазоны в каждом устройстве перекрываются двумя пределами измерения. Первый предел до 99,9 кА/м, второй — от 100 кА/м до максимального для данного устройства значения измеряемой величины. Время измерения зависит от величины измеряемой коэрцитивной силы и при ее максимальном значении не превышает 20 с. Питание устройств осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В, максимальная мощность, потребляемая при намагничивании, для первых двух модификаций не превышает 5 кВа, для последней — 9 кВа.

Конструктивно устройства выполнены в виде трех отдельных блоков — магнитной системы, блока управления (питания) и измерительного блока, связанных между собой и с сетью гибкими кабелями. Внешний вид цифрового автоматического коэрцитиметра показан на рис. 41. На передней панели измерительного блока расположены основные

органы управления работой коэрцитиметра — кнопочный переключатель режимов работы, пусковая кнопка, рукоятки резисторов регулировки контрольной отметки, нулевых показаний измерительных преобразователей и тока питания магнитной системы в режиме ручной регулировки. Конструктивной особенностью цифрового коэрцитиметра является наличие выдвижного измерительного столи-

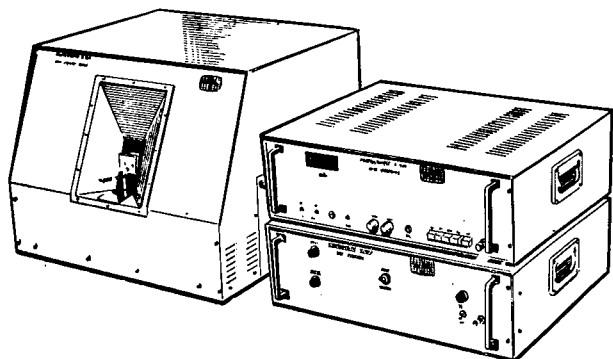


Рис. 41. Внешний вид цифрового автоматического коэрцитиметра.

ка, что связано с необходимостью обеспечения удобства установки испытуемых магнитов малой длины.

При оценке точности цифровой измерительной аппаратуры суммарная погрешность определяется с учетом характера и законов распределения вероятности отдельных ее составляющих и обычно характеризуется совокупностью аддитивной и мультипликативной составляющих. Основными составляющими суммарной погрешности [34] являются погрешности квантования, порога чувствительности усилителя некомпенсации и обратного преобразователя кода в компенсирующую величину. Применительно к цифровым автоматическим коэрцитиметрам дополнительно учитываются методические погрешности, связанные с неоднород-

ностью намагниченности испытуемых постоянных магнитов и внешнего размагничивающего поля, магнитной вязкостью и неоднородностью свойств материалов магнитов. Кроме того, должны быть учтены погрешности, обусловленные порогом чувствительности нулевого индикатора намагниченности и калибровкой устройства по контрольному магнитному полю.

В рассматриваемых устройствах аддитивная составляющая определяется погрешностью квантования и погрешностью установки нулевой отметки измерителя напряженности размагничивающего поля. Кроме того, к аддитивной составляющей в общем случае относится погрешность порога чувствительности усилителя некомпенсации, которая определяется в основном коэффициентом усиления этого усилителя. Так как в таких устройствах уравнивание схемы всегда происходит в одном и том же направлении, указанная погрешность постоянна по величине, имеет систематический характер и может быть учтена при настройке прибора. В связи с этим при анализе аддитивной составляющей эта погрешность не учитывается. При двух пределах измерения и трехзначном отсчетном устройстве погрешность квантования, равная половине шага квантования, составляет 0,05 и 0,5 кА/м соответственно для нижнего и верхнего пределов измерения. Так как установка нулевой отметки производится на нижнем пределе измерения, соответствующая погрешность, также равная половине шага квантования, составляет 0,05 кА/м. Рассмотренные погрешности имеют равномерный закон распределения и не имеют взаимной корреляционной связи, что позволяет произвести их геометрическое суммирование [32]. С учетом этого, среднеквадратичные значения аддитивной погрешности для нижнего и верхнего пределов измерения могут быть соответственно приняты равными 0,07 и 0,5 кА/м.

При анализе мультипликативной составляющей погрешности принималось, что методические погрешности, обусловленные неоднородностью намагниченности испытуемых

постоянных магнитов и внешнего размагничивающего поля, магнитной вязкостью и неоднородностью материала магнитов, не превышают соответственно 0,8 и 0,6%. При использовании преобразователя параллельного типа с переключающими ключами погрешность обратного преобразования кода в напряжение может быть получена не более 0,5%. Погрешность порога чувствительности индикатора намагниченности определяется коэффициентом усиления усилителя канала измерения намагниченности и при соответствующем выборе его величины может быть обеспечена не более 0,2%. Настройка прибора производится по значению напряженности контрольного поля, создаваемого в зазоре его магнитной системы. Так как эта операция выполняется на верхнем пределе измерения, а напряженность контрольного поля порядка 120—130 кА/м, погрешность установки этого значения, определяемая половиной шага квантования, около 0,4%. Кроме этой погрешности, при выбранном методе настройки прибора необходимо учесть погрешность определения напряженности контрольного поля и возможную нестабильность его значения. Для определения напряженности контрольного поля при использовании метода одновременного сравнения этого поля с полем вспомогательного источника, напряженность которого измеряется с высокой точностью, погрешность может составлять не более 0,5%. В качестве индикатора равенства при таких измерениях может быть использован тесламетр с преобразователем Холла. Погрешность, возникающая за счет нестабильности напряженности контрольного поля при использовании описанного выше метода стабилизации тока питания магнитной системы, может быть принята также не более 0,5%.

С учетом проведенного анализа отдельных погрешностей среднеквадратичное значение мультипликативной составляющей суммарной погрешности оценивается величиной 1,4%. При определении этой составляющей геометрически суммировались входящие в нее погрешности, так как они

не коррелированы между собой. Кроме того, было учтено, что для погрешностей, вызванных неоднородной намагниченностью магнита и неоднородностью внешнего поля, порогом чувствительности индикатора намагниченности, установкой контрольной отметки и определением напряженности контрольного поля, законы распределения можно считать равномерными, а для остальных погрешностей — нормальными. При такой композиции энтропийный коэффициент распределения результирующей погрешности находился между значениями коэффициентов равномерного и нормального распределений и был принят равным 1,95. Полученные значения аддитивной и мультипликативной составляющих позволяют представить суммарную погрешность измерения, %, цифровых автоматических коэрцитиметров соответственно для нижнего и верхнего пределов измерения:

$$\delta \Sigma_1' = \left(1,4 + \frac{0,07}{X} 100 \right); \quad (64)$$

$$\delta \Sigma_1'' = \left(1,4 + \frac{0,5}{X} 100 \right),$$

где X — измеряемое значение коэрцитивной силы. Полученные на основании этих выражений значения суммарных погрешностей для самых неблагоприятных условий измерения ($H_{cJ} = 20$ кА/м для нижнего и $H_{cJ} = 100$ кА/м для верхнего пределов измерения) не превышают соответственно 1,8 и 1,9%.

В соответствии с описанной выше методикой реально получаемые погрешности измерения для постоянных магнитов из литых магнитотвердых материалов не превышают 2%. При испытании образцов из магнитотвердых ферритов в отдельных случаях наблюдалось увеличение погрешности измерения до 3% по отношению к их паспортным данным. Неповторяемость результатов измерений, выполненных в одном и том же положении испытуемых магнитов относительно измерительных преобразователей, не превышает

0,5%. Учитывая, что температурный коэффициент изменения магнитных свойств для ферритов примерно на порядок выше, чем для литых материалов, увеличение погрешности измерения при их испытании следует отнести за счет несоответствия температур при аттестации стандартных образцов и при проводимых контрольных испытаниях.

3. ЦИФРОВОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Создание аппаратуры для автоматического измерения основных параметров материала при испытании постоянных магнитов является актуальной задачей магнитоизмерительной техники, вытекающей из требований производственного контроля их свойств. Разработанная цифровая измерительная схема обеспечивает [6] возможность измерения остаточной индукции и максимальной удельной магнитной энергии. В первом случае на основной и дополнительный входы измерительной схемы должны быть поданы сигналы, соответственно пропорциональные магнитной индукции и напряженности поля. Так как при определении магнитных характеристик не допускается реверсирования в направлении изменения магнитного состояния испытываемых магнитов, к значению измеряемой величины необходимо подходить сверху. Наиболее рационально при этом использовать цифровые следящие системы с реверсивными счетчиками импульсов, разработанные и широко применяемые в настоящее время [20] для построения цифровых автоматических мостов переменного тока.

В схеме для измерения максимальной удельной магнитной энергии в качестве источника счетных импульсов применен генератор переменной частоты ГПЧ. При подаче на вход основного измерительного тракта сигнала, пропорционального произведению индукции и напряженности

магнитного поля, можно измерять магнитную энергию и фиксировать ее значение в тот момент, когда в процессе увеличения напряженности размагничивающего поля она достигает своего максимального значения. В этот момент ГПЧ прекращает работу, так как при достижении максимального значения энергии управляющее напряжение на его входе переходит через нуль и при дальнейшем увеличении размагничивающего поля изменяет полярность.

Сложность таких измерений состоит в том, что магнитное состояние испытуемого магнита после снятия намагничивающего поля за счет незамкнутости магнитной системы смещается по кривой размагничивания в точку, расположенную во втором квадранте гистерезисного цикла. Эта точка при малых относительных длинах испытуемых магнитов может находиться не только ниже остаточной индукции материала, но и ниже точки, соответствующей максимальному значению магнитной энергии. Указанное обстоятельство приводит к необходимости введения в схему устройства дополнительных элементов, обеспечивающих возможность автоматического измерения и управления постоянным намагничивающим полем в первом квадранте гистерезисного цикла и, в случае необходимости, переключающих измерительную и силовую схемы для работы во втором квадранте.

Структурная схема цифрового автоматического устройства построена с учетом отмеченных особенностей (рис. 42). Эта схема позволяет измерять коэрцитивную силу по намагниченности и по индукции, остаточную индукцию и максимальную удельную магнитную энергию при испытании постоянных магнитов в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой. В отличие от рассмотренной выше (рис. 40) эта схема полностью автоматизирована и не требует вмешательства оператора и ручных переключений при переходе от режима намагничивания к режиму измерения. Чувствительные элементы схемы — два преобразователя Холла П₁ и П₂, измеряющие соответственно намагни-

ченность и напряженность поля испытываемого магнита. Для получения истинного значения индукции в схеме предусмотрена возможность коррекции выходного сигнала преобразо-

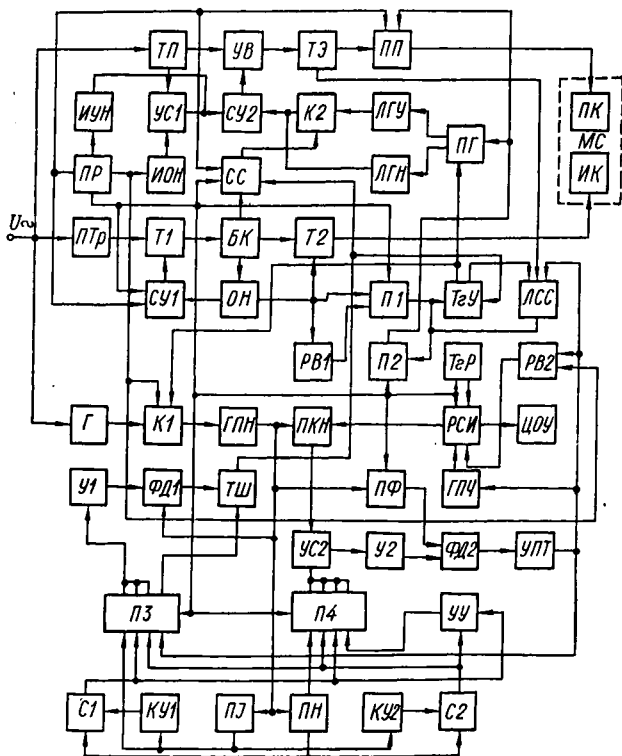


Рис. 42. Структурная схема цифрового автоматического устройства для измерения магнитных параметров.

вателя намагниченности (с помощью корректирующего усилителя $KУ1$) и суммирования его с сигналом преобразователя напряженности поля (с помощью сумматора $С1$). Аналогичным образом с помощью корректирующего уси-

лителя $KУ2$ и сумматора $С2$ обеспечивается получение истинного значения напряженности поля. Блок постоянного тока управляется с помощью двух линейных генераторов (нарастания $ЛГН$ и убывания $ЛГУ$), которые позволяют создавать в $ПК$ ток, линейно нарастающий от нуля до максимального значения или линейно убывающий от максимума до нуля. Для управления этими генераторами в схему устройства введен переключатель генераторов $ПГ$ и ключ $K2$, при отпирании которого выходное напряжение неработающего $ЛГУ$ полностью открывает $УВ$. Измерительная схема снабжена реверсивным счетчиком импульсов $РСИ$, триггером реверса $TгР$, триггером управления $TгУ$, переключателем фазы $ПФ$ и умножающим устройством $УУ$. С помощью переключателя $П1$ на входе $TгУ$ запускается измерительная схема, переключатель $П2$ управляет $ПГ$ и $ПП$, переключатели $П3$ и $П4$ коммутируют выходные сигналы измерительных преобразователей.

Особенностью работы устройства в режиме измерения максимальной удельной магнитной энергии является то, что в зависимости от относительных размеров испытуемых магнитов точка, характеризующая их магнитное состояние на кривой размагничивания, после снятия намагничивающего поля может находиться ниже или выше точки, соответствующей максимальному значению магнитной энергии. В первом случае она измеряется при плавном уменьшении намагничивающего поля, во втором — при плавном нарастающем размагничивающем поле. Схема устройства осуществляет автоматический переход от одного режима измерения максимальной удельной магнитной энергии к другому. Это обеспечивается с помощью логической схемы тройного совпадения $ЛСС$, на входы которой подаются сигналы с выходов $УПТ$, дополнительного выхода $TгУ$ и токового элемента $TЭ$, включенного в цепи питания $ПК$. Схема срабатывает при поступлении одновременно на все ее входы нулевых сигналов. Во всех режимах, кроме режима измерения максимальной магнитной энергии, тройного совпадения

нулевых сигналов на входе ЛСС не происходит, так как процесс измерения заканчивается при наличии тока в ПК. Появление на входе ЛСС трех нулевых сигналов свидетельствует о том, что при снижении постоянного намагничивающего поля значения максимальной магнитной энергии не достигнуто. В этом случае ЛСС подает сигналы на ПГ и Т_{2У}, которые запускают силовую и измерительную схемы для дальнейшего измерения магнитной энергии.

Построенное по описанной структурной схеме цифровое автоматическое устройство обеспечивает измерение основных параметров материала при испытании постоянных магнитов из литых материалов с коэрцитивной силой до 150 кА/м, остаточной индукцией до 1,5 Т и максимальной удельной магнитной энергией до 50 кДж/м³. Устройство позволяет испытывать магниты длиной от 5 до 80 мм, сечением до 50 см². Погрешность измерения при определении коэрцитивной силы по намагниченности не более 2%, при определении коэрцитивной силы по индукции и остаточной индукции не превышает 3%. Погрешность измерения максимальной магнитной энергии 5%, время измерения одного параметра не более 20 с. Питание устройства осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В, максимальная мощность, потребляемая при намагничивании, не превышает 9 кВА. Конструктивно устройство выполнено в виде трех отдельных блоков — магнитной системы, блока управления и измерительного блока.

Рассмотрим различные режимы работы этого устройства. При измерении коэрцитивной силы по намагниченности устройство работает в режиме, аналогичном режиму работы цифровых автоматических коэрцитиметров. Суммарные погрешности для нижнего и верхнего пределов измерения определяются в этом случае выражениями (64) и для самых неблагоприятных условий измерения не превышают 2%. В других режимах работы среднеквадратичные значения аддитивной составляющей погрешности (для нижнего и верхнего пределов измерения) на основании проведенного анали-

за (стр. 135) могут быть приняты равными 0,07 и 0,5 кА/м при измерении коэрцитивной силы по индукции, $0,7 \cdot 10^{-3}$ и $5 \cdot 10^{-3}$ Т — при измерении остаточной индукции, $0,7 \times 10^{-2}$ и $5 \cdot 10^{-2}$ кДж/м³ — при измерении максимальной удельной магнитной энергии. При анализе мультипликативных составляющих погрешностей измерения этих величин методические погрешности, обусловленные неоднородной намагниченностью испытуемых магнитов и неоднородностью внешнего магнитного поля, не учитывались, так как калибровка устройства в этих режимах работы производится по результатам измерения параметров стандартных образцов. Значения погрешностей за счет влияния магнитной вязкости и неоднородности магнитных свойств материала магнитов, обратного преобразования, порога чувствительности нулевого индикатора и законы их распределения принимались такими же, как и при анализе цифровых автоматических коэрцитиметров. При калибровке каналов измерения напряженности поля и индукции (с учетом того, что для магнитов из литых материалов кажущаяся остаточная индукция может изменяться от 0,2 до 1,1 Т, а напряженность собственного размагничивающего поля от 20 до 100 кА/м) погрешности установки значений параметров, соответствующих стандартным образцам, принимались равными 0,5% и распределялись по равномерным законам. Погрешности определения указанных параметров стандартных образцов не превышают 2% и имеют нормальные законы распределения. Кроме того, при определении мультипликативных составляющих погрешностей измерения коэрцитивной силы по индукции и остаточной индукции должны быть учтены погрешности, обусловленные отклонением размеров испытуемых магнитов от размеров стандартных образцов и неточностью установки магнитов относительно измерительных преобразователей. Эти погрешности при измерении коэрцитивной силы по индукции соответственно равны 0,2 и 0,5%, а при измерении остаточной индукции —

0,7 и 1,3%; законы распределения погрешностей могут быть нормальными.

При измерении максимальной удельной магнитной энергии последние две составляющие мультипликативной погрешности с учетом их тесной корреляционной связи могут быть просуммированы алгебраически. В этом случае значения погрешностей за счет отклонения размеров испытуемых магнитов от размеров стандартных образцов и неточности установки испытуемых магнитов относительно измерительных преобразователей можно принять равными 0,9 и 1,8% соответственно. Кроме того, должна быть учтена погрешность умножающего устройства, которая не превышает 1% и имеет нормальный закон распределения.

Принимая, как и ранее, что при подсчете среднеквадратичных значений соответствующих мультипликативных составляющих погрешностей энтропийный коэффициент распределения результирующей погрешности равен 1,95, запишем суммарные погрешности измерения, %, отдельных параметров испытуемых магнитов. При измерении коэрцитивной силы по индукции на нижнем и верхнем пределе измерения:

$$\delta \Sigma'_2 = \left(2,2 + \frac{0,07}{X} 100\right); \quad \delta \Sigma''_2 = \left(2,2 + \frac{0,5}{X} 100\right).$$

При измерении остаточной индукции:

$$\delta \Sigma'_3 = \left(2,6 + \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{X} 100\right);$$
$$\delta \Sigma''_3 = \left(2,6 + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{X} 100\right).$$

При измерении максимальной удельной магнитной энергии:

$$\delta \Sigma'_4 = \left(3,5 + \frac{0,007}{X} 100\right); \quad \delta \Sigma''_4 = \left(3,5 + \frac{0,05}{X} 100\right),$$

где X — измеренные значения соответствующих величин. Полученные на основании этих выражения значения суммарных погрешностей при самых неблагоприятных условиях измерения ($H_{сБ} = 20$ и 100 кА/м, $B_r = 0,4$ и $1,0$ Т, $W_{\max} = 3$ и 10 кДж/м³) не превышают 3% при измерении коэрцитивной силы по индукции и остаточной индукции и 5% при измерении максимальной удельной магнитной энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматические и полуавтоматические устройства для массового контроля двухполюсных постоянных магнитов.— В кн.: Устройства для испытания магнитотвердых материалов. К., 1971, с. 48—58 с ил. Авт.: Пеккер И. И., Галикян Г. С., Кураков Е. И., Шкарупин А. Я., Монацкова В. И., Дигун О. Г.

2. Андриевский Е. А. Использование импульсного намагничивания с подмагничиванием при испытании магнитно-твердых материалов.— В кн.: Проблемы технической электродинамики. Вып. 28. К., 1971, с. 97—100 с ил.

3. Андриевский Е. А. К испытанию магнитно-твердых материалов.— «Измерительная техника», 1973, № 8, с. 56—58 с ил.

4. Андриевский Е. А., Ефимушкин Ю. А. Исследование и устранение обратного выброса поля в намагничивающем устройстве с импульсным трансформатором.— В кн.: Приборы и аппаратура для электрических и магнитных измерений. К., 1972, с. 114—151 с ил.

5. Андриевский Е. А., Ефимушкин Ю. А., Кемпайнен В. К. К выбору параметров намагничивающего устройства с непосредственным питанием от сети переменного напряжения.— В кн.: Контрольно-измерительная техника. Вып. 11. Львов, 1971, с. 71—75 с ил.

6. Андриевский Е. А., Лесник Л. Н. Измерительные схемы цифровых автоматических устройств для испытания постоянных магнитов.— В кн.: Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры. Л., НТО Приборпром, 1972, с. 98—102 с ил.

7. Андриевский Е. А., Лесник Л. Н., Непокрытый Я. Ф. Компенсация вертикальной составляющей размагничивающего поля в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой.— В кн.: Проблемы технической электродинамики. Вып. 40. К., 1973, с. 89—92 с ил.

8. Андриевский Е. А., Лесник Л. Н., Непокрытый Я. Ф. Коэрцитиметр. Авт. свидетельство № 410344.— «Бюллетень», 1974, № 1. 148 с.

9. Андриевский Е. А., Лесник Л. Н., Швердин Г. П. Регулируемый источник питания. Авт. свидетельство № 356740.— «Бюллетень», 1972, № 32. с. 157.

10. Андриевский Е. А., Непокрытый Я. Ф. Влияние магнитной вязкости и неоднородности магнитных свойств на результат измерения коэрцитивной силы.— В кн.: Исследование электроизмерительных и магнитоизмерительных устройств. К., 1967, с. 171—178 с ил.

11. Андриевский Е. А., Непокрытый Я. Ф. Коэрцитиметр для магнитно-твердых материалов с пределом измерения 150 кА/м.— В кн.: Повышение точности и автоматизация электрических и магнитных измерительных устройств. К., 1968, с. 165—171 с ил.

12. Андриевский Е. А., Непокрытый Я. Ф., Лесник Л. Н. Устройство для импульсного намагничивания изделий из высококоэрцитивных материалов. Авт. свидетельство № 291175.— «Бюллетень», 1971, № 3. 114 с.

13. Андриевский Е. А., Непокрытый Я. Ф., Михеева Л. Н. К анализу параметров цепи импульсного намагничивания.— В кн.: Контрольно-измерительная техника. Вып. 4. Львов, 1968, с. 59—65 с ил.

14. Андриевский Е. А., Таранов С. Г. Новые методы определения основных параметров динамической гистерезисной петли.— В кн.: Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры. Л., НТО Приборпром, 1972, с. 120—124 с ил.

15. Аркадьев В. К. Электромагнитные процессы в металлах. Ч. I. М., Госэнергоиздат, 1934. 178 с. с ил.

16. Артемова М. А. Влияние степени однородности намагничивания стандартного образца магнитно-твердого материала на точность его аттестации.— В кн.: Устройства для испытания магнитно-твердых материалов. К., 1971, с. 105—113 с ил.

17. Булгаков Н. В., Кондорский Е. И. Магнитная вязкость и роль смещения границ между доменами в процессе перемагничивания высококоэрцитивных сплавов.— «Доклады АН СССР», 1949, № 2, с. 248—251 с ил.

18. Буравлев В. В., Маркин П. П. Установка для определения индукции и напряженности поля постоянных магнитов в любой точке предельной петли гистерезиса.— В кн.: Труды метрологических ин-тов СССР. Вып. 95 (115). М.—Л., 1967, с. 91—96 с ил.

19. Вопросы автоматизации испытания магнитно-твердых материалов.— В кн.: Устройства для испытания магнитно-твердых материалов. К., 1971, с. 58—66 с ил. Авт.: Шихин А. Я., Казаков В. Н., Лагутин О. Б., Сергеев В. Г., Сильванский И. В.

20. Гриневич Ф. Б. Автоматические мосты переменного тока. Новосибирск, Ред.-изд. отд. Сиб. отд.-ния АН СССР, 1964. 216 с. с ил.

21. Зингерман В. И. Методы и средства измерения магнитных характеристик магнитно-твердых материалов и постоянных магнитов.— «Метрология», 1972, № 1, с. 33—53.

22. Иванчук Б. Н., Липман Р. А., Рувинов Б. Я. Тиристорные и магнитные стабилизаторы напряжения. М., «Энергия», 1968. 112 с. с ил.

23. Кифер И. И. Испытания ферромагнитных материалов. М., «Энергия», 1969. 360 с. с ил.
24. Комплексные устройства для магнитных измерений.— В кн.: Новые приборы и комплексные устройства для точных электрических и магнитных измерений. К., УкрНИИТИ, 1970, с. 50—56 с ил. Авт.: Горнштейн-Нейман Г. Л., Гаухштейн В. В., Лебедев Ю. М., Монастырский Е. Г., Харьковской Б. А.
25. Конашинский Ю. А., Новогренко В. Е. Установка с мостовым пермеаметром для контроля постоянных магнитов.— В кн.: Устройства для испытания магнитно-твердых материалов. К., 1971, с. 95—99 с ил.
26. Леонов А. М., Офицеров М. М. Стабилизация зарядного напряжения емкостных накопителей энергии мощных импульсных устройств.— «Приборы и техника эксперимента», 1969, № 1, с. 123—125 с ил.
27. Магнитные измерения. М., Изд-во Комитета стандартов, 1969. 248 с. с ил. Авт.: Чернышев Е. Т., Чечурина Е. Н., Чернышева Н. Г., Студенцов Н. В.
28. Маркин П. П. Феррометр для испытания постоянных магнитов.— В кн.: Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры. Л., НТО Приборпром, 1972, с. 107—111 с ил.
29. Материалы магнитно-твердые литые. Методы определения статических магнитных характеристик образцов. ГОСТ 13601—68. М., Изд-во Комитета стандартов, 1968, 20 с. с ил.
30. Методика испытания образцов магнитно-твердых материалов при импульсном намагничивании.— «Измерительная техника», 1965, № 1, с. 40—43 с ил. Авт.: Ягола Г. К., Зингерман В. И., Гробовицкий М. И., Сепетый В. Н.
31. Нестеренко А. Д. Введение в теоретическую электротехнику. К., «Наукова думка», 1969. 352 с. с ил.
32. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., «Энергия», 1968. 248 с. с ил.
33. Определение статических характеристик магнитно-твердых материалов в устройствах с ферромагнитным преобразователем Холла.— В кн.: Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры. Л., НТО Приборпром, 1972, с. 73—76 с ил. Авт.: Горнштейн Г. Л., Маршаленко Б. А., Нестеренко А. Д., Таранов С. Г., Февралева Н. Е.
34. Орнатский П. П. Автоматические измерения и приборы. К., «Вища школа», 1971. 552 с. с ил.
35. Постоянные магниты. Справочник. Под ред. Ю. М. Пятина, М., «Энергия», 1971. 376 с. с ил.
36. Преображенский А. А. Теория магнетизма, магнитные материалы и элементы. М., «Высшая школа», 1972. 288 с. с ил.
37. Преображенский А. А., Работнов Р. Д. Малогабаритные установки для импульсного намагничивания постоянных магнитов.— «Изв.

- вузов СССР. Приборостроение», 1964, т. VII, № 6, с. 113—116 с ил.
38. Рейнбот Г. Технология и применение магнитных материалов. М.—Л. Госэнергоиздат, 1963. 339 с. с ил.
39. Рыжков Г. П., Фридман М. Н. Полуавтоматическая установка для магнитной подготовки и разбраковки постоянных магнитов.—В кн: Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры. Л., НТО Приборпром, 1972, с. 133—137.
40. Сильванский И. В., Шихин А. Я. К определению максимальной величины намагничивающего поля для исследования магнитно-твердых материалов.—«Электромеханика», 1969, № 6, с. 676—678.
41. Способ измерения магнитной индукции в образце из магнитно-твердого материала. Авт. свидетельство № 272426.—«Бюллетень», 1970, № 19, с. 57. Авт.: Андриевский Е. А., Маршаленко, Б. А., Таранов С. Г., Февралева Н. Е.
42. Устройство для определения коэрцитивной силы с автоматическим процессом измерения.— В кн.: Устройства для испытания магнитно-твердых материалов. К., 1971, с. 67—74 с ил. Авт.: Андриевский Е. А., Лесник Л. Н., Непокрытый Я. Ф., Швердин Г. П.
43. Устройство для создания импульсных магнитных полей. Авт. свидетельство № 347817.—«Бюллетень», 1972, № 24, с. 170. Авт.: Андриевский Е. А., Лесник Л. Н., Непокрытый Я. Ф., Швердин Г. П.
44. Февралева Н. Е. Магнитно-твердые материалы и постоянные магниты. К., «Наукова думка», 1969. 232 с. с ил.
45. Цифровой автоматический коэрцитиметр для испытания магнитно-твердых ферритов.— В кн.: Приборы для исследования физических свойств материалов. К., 1974, с. 229—231 с ил. Авт.: Андриевский Е. А., Лесник Л. Н., Непокрытый Я. Ф., Лындин Э. Я.
46. Швецкий Б. И. Электронные измерительные приборы с цифровым отсчетом. К., «Техніка», 1970. 268 с. с ил.
47. Шихин А. Я. Анализ намагничивающих систем и устройств для испытания ферромагнитных материалов. Автореф. докт. дис. М., МЭИ, 1973. 45 с. с ил.
48. Шрамков Е. Г. О характеристиках магнитно-твердых материалов и постоянных магнитов для нормативных документов и о справочных характеристиках. Труды метрологических ин-тов СССР. Вып. 95 (155). М.—Л., Стандартгиз, 1967, с. 67—71.
49. Электрические измерения. Под ред. Е. Г. Шрамкова. М., «Высшая школа», 1972. 520 с. с ил.
50. Andrijewskij I. A. Fiewralewa N. J, Taranow S. G. Mierniki indukcji magnetycznej i koercymetry. Pomiaru, automatyka, kontrola, 1967, № 11, p. 502—505, ill.
51. Stablein F., Steinitz R. Ein neuer Doppeljoch Magnetstahlprüfer, Arch. für des Eisenhüttenwesen, 1935, Juni, 12, p. 549—554, ill.
52. Steingrower E. Gerät zum Messen von Magnetisierungskurven. Patentschrift 871185, kl. 21e, gr. 12, Marz, 1953, p. 2.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Глава I. Основные направления разработки аппаратуры для испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов	5
1. Характеристики и параметры, определяющие свойства магнитотвердых материалов и постоянных магнитов	5
2. Требования к лабораторной и производственной магнитоизмерительной аппаратуре	7
3. Устройства для испытания магнитотвердых материалов и постоянных магнитов	10
Глава II. Взаимосвязь магнитных характеристик, определяемых в различных условиях	17
1. Сравнение характеристик, определяемых в устройствах с замкнутой и разомкнутой магнитной системой	17
2. Влияние способа определения напряженности размагничивающего поля на погрешность измерения коэрцитивной силы в устройствах с разомкнутой магнитной системой	22
3. Аналитическая связь между характеристиками, определяемыми в устройствах с замкнутой и неполностью замкнутой магнитной системой	25
4. Зависимость поправочных коэффициентов от геометрических параметров испытуемых образцов и магнитной системы	29
Глава III. Принципы построения измерительных устройств для непосредственного определения параметров материала	37
1. Измерение коэрцитивной силы и других параметров материала в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой	37
2. Определение параметров материала при периодическом перемагничивании образцов	42
3. Использование гальваномагнитных эффектов в образце для определения параметров материала	47

Глава IV. Факторы, влияющие на точность измерения параметров материала	49
1. Недоведение материала испытуемых магнитов до насыщения	49
2. Влияние магнитной вязкости и неоднородности магнитных свойств материала испытуемых магнитов	51
3. Неоднородность внешнего магнитного поля и неточное определение состояния, при котором измеряются параметры	58
4. Отклонение размеров испытуемых магнитов от размеров стандартных образцов при калибровке по ним измерительных каналов	65
5. Неточность установки испытуемых магнитов относительно измерительных преобразователей	67
6. Способы повышения точности измерения в устройствах с неполностью замкнутой магнитной системой	69
Глава V. Способы создания намагничивающих и размагничивающих полей	78
1. Устройства для получения постоянных регулируемых магнитных полей	78
2. Импульсные намагничивающие устройства, основанные на емкостном методе накопления энергии	86
3. Импульсные намагничивающие устройства с непосредственным питанием от сети переменного напряжения	93
4. Использование комбинированного намагничивания	98
Глава VI. Оптимизация параметров импульсных намагничивающих устройств	103
1. Влияние режима работы и параметров импульсной цепи на амплитуду и длительность импульса в намагничивающих устройствах емкостного типа	103
2. Выбор оптимальных параметров емкостных намагничивающих устройств	110
3. Оптимизация параметров намагничивающих устройств с непосредственным питанием от сети переменного напряжения	117
Глава VII. Устройства с неполностью замкнутой магнитной системой для испытания постоянных магнитов	122
1. Аналоговые устройства для определения коэрцитивной силы постоянных магнитов	122
2. Цифровые автоматические устройства для определения коэрцитивной силы	130
3. Цифровое автоматическое устройство для определения основных параметров магнитотвердых материалов	138
Литература	146

Евгений Александрович Андриевский,
канд. техн. наук

Измерение параметров постоянных магнитов

Редактор издательства инж. *Л. И. Носова*
Обложка художника *Л. Б. Сергия*
Художественные редакторы *В. С. Шапошников, И. В. Рублева*
Технический редактор *С. В. Иванус*
Корректор *В. В. Цекало*

ИБ № 435

Сдано в набор 10. III. 1976 г. Подписано к печати 8. II. 1977 г. Формат бумаги 70×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Объем: 6,65 усл. печ. л.; 6,78 уч.-изд. л.
Тираж 3000. Зак. № 7—369. БФ 04708. Цена 44 коп.

Издательство «Техніка», 252601, Киев, 1, ГСП, Пушкинская, 28.

Отпечатано с матриц Головного предприятия республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Госкомиздата УССР, г. Киев, Довженко, 3 на Киевской фабрике печатной рекламы, Киев, Выборгская, 84.

44 коп.

б-77

54

