

6  
А-24

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

ОБЪЕДИНЕННЫЙ УЧЕНЫЙ СОВЕТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

---

С. Т. УСАТЕНКО

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАГНИТНОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Автореферат  
диссертации, представленной на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
член-корр. АН УССР, доктор технических наук,  
профессор А. Д. НЕСТЕРЕНКО

КИЕВ — 1964



6  
А 24

Постоянные магниты широко применяются в автоматике, вычислительной технике, радиоэлектронике, электромашиностроении, приборостроении и других областях техники. Современные магнитотвердые материалы (м.т.м.) позволяют создавать малогабаритные, легкие, экономичные, надежные в работе приборы и устройства с хорошими эксплуатационными характеристиками.

Повышение качества, рост производства, расширение номенклатуры и широкое использование м.т.м. требует всесторонней оценки их магнитных свойств, что невозможно без наличия соответствующей магнитноизмерительной аппаратуры и широкой автоматизации процесса испытания.

В настоящее время широкое распространение для испытания м.т.м. нашли установки, использующие импульсно-индукционный метод. Однако этот метод не позволяет получать непосредственный отсчет измеряемых величин, автоматизировать процесс испытания, требует больших расчетных операций и длительного времени на измерение и их обработку. Устройства, применяемые для испытания м.т.м. без коммутации магнитного потока в образце, позволяют исключить указанные недостатки. Однако ряд вопросов, связанных с разработкой таких устройств, требует дальнейших исследований.

Данная работа посвящена исследованию существующих устройств для испытания м.т.м. и разработке аппаратуры, наиболее полно удовлетворяющей современным требованиям.

### Магнитотвердые материалы и требования к аппаратуре для их испытания

Развитие м.т.м. идет очень быстрыми темпами. За последние двадцать лет магнитная энергия увеличилась почти в пять раз; в настоящее время промышленностью освоены сплавы с максимальной удельной энергией до  $32 \text{ кдж/м}^3$  и разрабатываются сплавы с энергией до  $40\text{—}44 \text{ кдж/м}^3$ . Широко применяются сплавы с коэрцитивной силой до  $130 \text{ ка/м}$ , а в экспериментальных образцах коэрцитивная сила доходит до  $400 \text{ ка/м}$ .

1

Центральная научная  
БИБЛИОТЕКА  
Академии наук Киргизской ССР

308665



Остаточная индукция сплавов выросла с  $1,0 \text{ вб/м}^2$  до  $1,4 \text{ вб/м}^2$  при довольно значительной коэрцитивной силе.

По магнитным свойствам существующие сплавы, используемые в технике, можно подразделить на:

низкокоэрцитивные, с коэрцитивной силой до  $25 \text{ ка/м}$ ,

среднекоэрцитивные, с коэрцитивной силой  $25-75 \text{ ка/м}$ ,

высококоэрцитивные, с коэрцитивной силой свыше  $75 \text{ ка/м}$ .

Сплавы третьей группы значительное развитие получили в последнее время и ввиду их исключительных достоинств находят все более широкое применение. При разработке аппаратуры для испытания м.т.м. основное внимание уделено испытанию сплавов этой группы.

Магнитные свойства современных м.т.м. и необходимость испытания готовых изделий в производственных условиях определяют следующие основные требования, которым должна удовлетворять современная аппаратура: а) возможность создания в рабочем зазоре магнитных полей не менее  $500 \text{ ка/м}$ , б) погрешность измерения не более  $2-3\%$ , в) стабильность показаний во времени, г) равномерное магнитное поле по сечению зазора до  $10-12 \text{ см}^2$ , д) широкий диапазон пределов измеряемых величин, е) непосредственный отсчет измеряемых величин, ж) возможность автоматизации процесса испытания и записи магнитных характеристик, з) возможность испытаний как образцов, так и готовых изделий.

#### *Анализ некоторых погрешностей импульсно-индукционного метода, возникающих при испытании магнитно-твердых материалов*

Импульсно-индукционный метод с применением баллистического гальванометра наиболее широко используется для испытания м.т.м. как в лабораторных, так и в производственных условиях. Этот метод положен в основу промышленной установки У-541. В употреблении находится также большое количество нестандартных установок, изготовленных предприятиями, на которых они эксплуатируются. Величина погрешности этих установок зависит от точности определения подставляемых в уравнение взаимосвязи величин и от конструктивных особенностей установки. Как показал проведенный Е. Г. Шрамковым и другими теоретический анализ расчетных формул, первый вид погрешностей при определении индукции и напряженности поля не превышает  $2-3\%$ . При испытании м.т.м. погрешности, обусловленные конструктивными особенностями установки, в частности, индуктивностью намагничивающего устройства, скоростью переключения намагничивающего тока, питанием установки от выпрямителя, вихревыми токами в магнитопроводе и

в образце при коммуникации магнитного потока, достигают значительной величины, особенно при определении индукции. Поскольку эти погрешности не всегда учитываются при испытании м.т.м. ввиду отсутствия достаточных сведений о их характере и величине, то характеристики одних и тех же образцов, определенные на разных установках значительно отличаются. Проведенные испытания образца  $50 \times 10 \times 10 \text{ мм}^3$  показали, что это отличие на шести различных установках составляет для остаточной индукции  $-8\%$ , для коэрцитивной силы  $-6\%$ .

Погрешности, обусловленные большой индуктивностью намагничивающего устройства, рассмотрены Е. М. Ермаковой. На основании проведенного ею анализа установлено, что погрешности в этом случае могут достигать  $26\%$ . Для их снижения следует уменьшать индуктивность намагничивающих катушек или исключать процесс переключения намагничивающего тока.

Проведенные нами исследования позволили определить характер и величину остальных из указанных выше погрешностей.

Погрешности, обусловленные скоростью коммутации магнитного потока зависят прежде всего от конструктивного исполнения коммутирующего устройства. Время переключения тока может быть порядка  $0,1-0,8 \text{ сек}$ . При этом погрешность измерения, вызванная изменением скорости переключения, может достигать до  $3\%$  и выше. Из проведенного теоретического анализа, подтвержденного осциллографированием переходных процессов, следует, что величина этой погрешности зависит от скорости переключения, времени первого отброса рамки гальванометра и параметров установки для испытания м.т.м. Для уменьшения этой погрешности следует применять быстродействующее коммутирующее устройство, уменьшать индуктивность намагничивающих катушек и применять баллистический гальванометр с большим периодом.

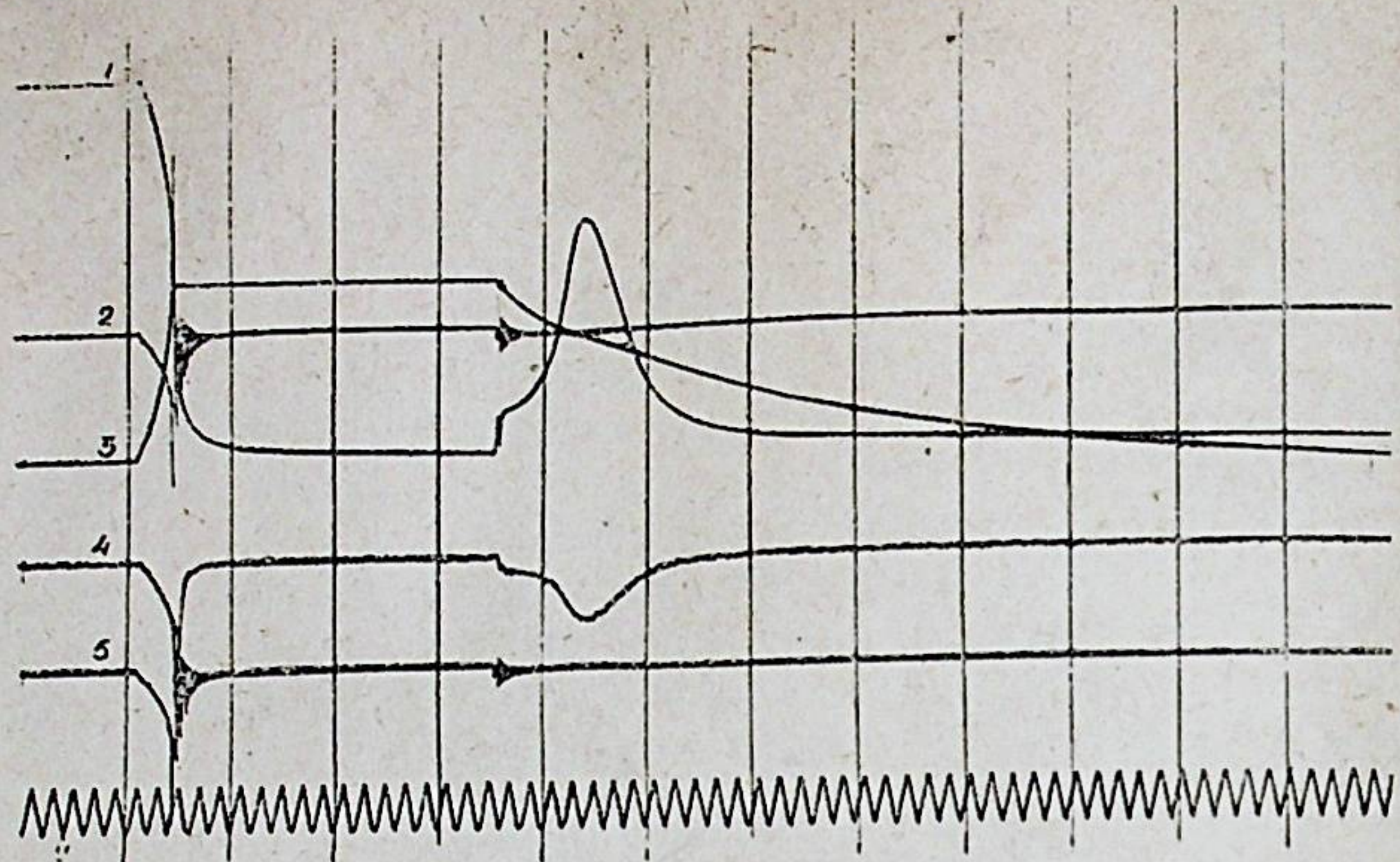
Погрешность, возникающая при питании намагничивающего устройства от выпрямителя, зависит от двух факторов: магнитного состояния образца, обусловленного пульсирующим намагничивающим полем, и наводимой в измерительных обмотках пульсирующей эдс. На рис. 1 приведены две осциллограммы, описывающие процессы, происходящие при испытании образца; осциллограмма (рис. 1а) снята при питании намагничивающего устройства от аккумуляторной батареи, осциллограмма (рис. 1б) — при питании от однофазного двухполупериодного выпрямителя при том же токе намагничивания и неизменных условиях испытания. Кривая 1 показывает изменение тока в намагничивающих катушках, кривая 2 — изменение эдс в обмотке, расположенной на магнитопроводе, кривая 3 — изменение эдс в обмотке, расположенной на образце, кривая 4 — изменение тока в цепи баллистического гальванометра, кривая 5 — изме-



нение эдс в катушке для измерения напряженности поля. Отметки интервалов времени через 0,1 сек. Из приведенных осциллограмм видно, что в цепи баллистического гальванометра возникает сильная пульсация, величина которой соизмерима с полезным сигналом.

Величина составляющей погрешности от первого фактора определяется выражением:

$$\xi'_B = \frac{2}{m^2 - 1} \frac{\mu_\Delta - \mu_0}{\mu} 100\%, \quad (1)$$



а

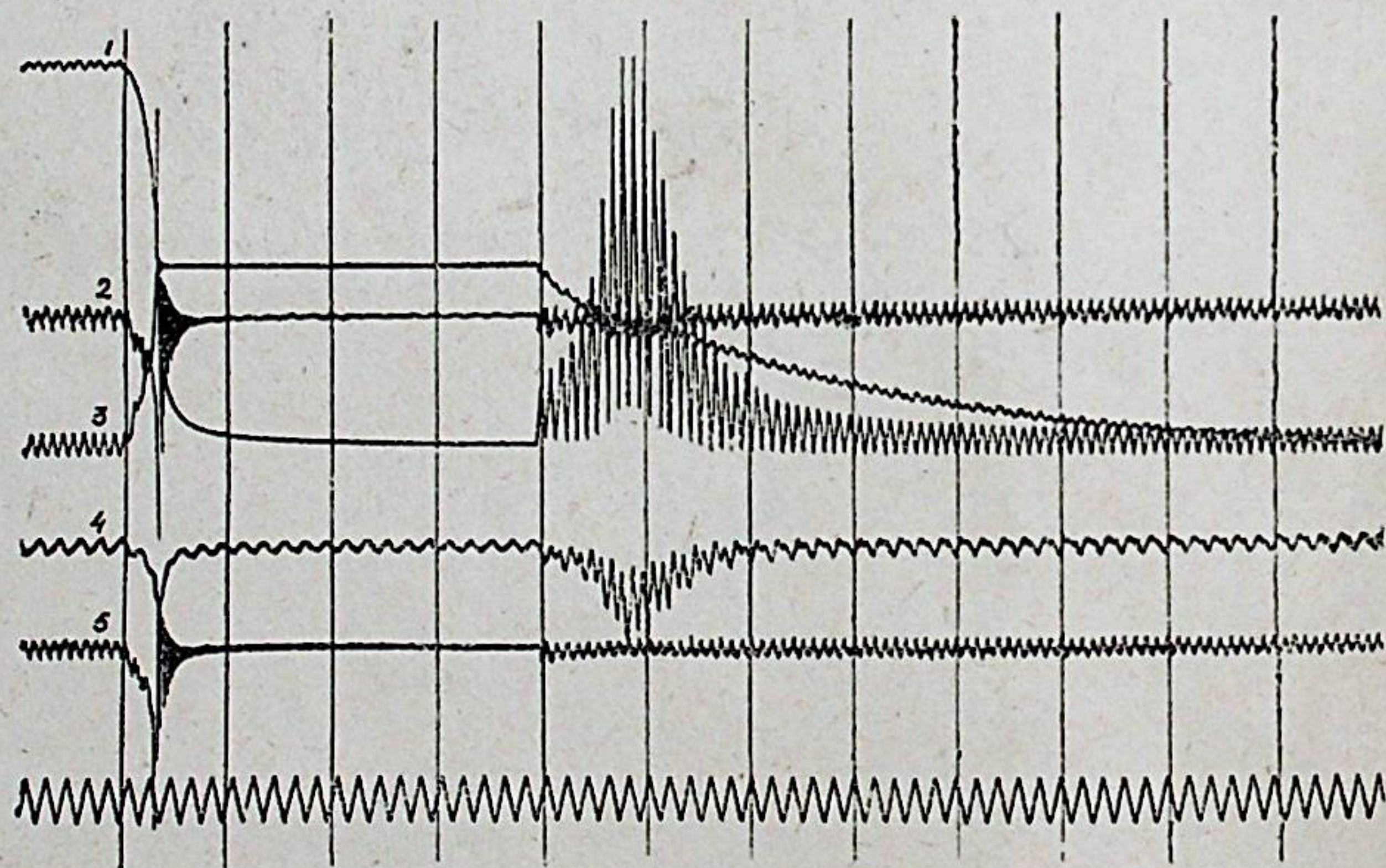


Рис. 16.

логграмм видно, что в цепи баллистического гальванометра возникает сильная пульсация, величина которой соизмерима с полезным сигналом.

где:  $\mu_\Delta$ ,  $\mu_0$  — магнитные проницаемости возрастания и убывания,  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость,  $m$  — число фаз выпрямителя.

Величина составляющей погрешности от второго фактора равна:

$$\xi''_B = \frac{\alpha_{\text{пост}} - \alpha_{\text{пер}}}{\alpha_{\text{пост}}} 100\% = \frac{Q_{\text{пост}} - Q_{\text{пер}}}{Q_{\text{пост}}} 100\%, \quad (2)$$

где:  $\alpha_{\text{пост}}$ ,  $Q_{\text{пост}}$  — отброс гальванометра и количество электричества прошедшего через рамку при питании намагничивающих катушек от аккумулятора,  $\alpha_{\text{пер}}$ ,  $Q_{\text{пер}}$  — то же при питании намагничивающих катушек от выпрямителя.

Значение каждой составляющей погрешности зависит от положения определяемых точек на кривой  $B=f(H)$  и величины пульсации, знаки они имеют противоположные.

Полная погрешность в каждой точке кривой будет определяться их соотношением. Экспериментальные данные показывают, что в области остаточной индукции погрешность находится в пределах точности измерения, в области коэрцитивной силы она отрицательна и может достигать до (3—4)%. Кривая намагничивания, определенная при питании намагничивающего устройства от аккумуляторной батареи идет выше кривой, определенной при питании от выпрямителя. Для уменьшения этой погрешности при отсутствии мощного источника постоянного тока следует использовать трехфазный двухполупериодный выпрямитель, позволяющий получать удовлетворительные результаты испытания.

При коммутации магнитного потока в образце и в магнитопроводе, если он изготовлен из литого материала, возникают вихревые токи, вызывающие погрешности при измерении, значение которых может быть определено из выражения:

$$\xi_{B\phi} = \frac{Uab\mu\rho_0}{k\Phi_u\rho \operatorname{ch} t/\tau} 100\%, \quad (3)$$

где:  $a \cdot b$  — сечение образца или магнитопровода,  $U$  — подводимое напряжение питания,  $\Phi_u$  — значение измеряемого потока,  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала образца,  $\tau$  — постоянная намагничивающего устройства,  $t$  — время переходного процесса,  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Как показали проведенные расчеты, погрешность из-за вихревых токов в образце, если магнитопровод шихтованный, при определении точек кривой размагничивания может быть порядка десятых процента. При испытании образцов в сплошном магнитопроводе эта погрешность может возрасти до нескольких процентов.



Таким образом, при испытании магнитотвердых материалов импульсно-индукционным методом необходимо учитывать рассмотренные выше факторы, влияющие на точность результатов испытания и при конструировании установок для испытания м.т.м. принимать меры для их устранения. Тогда при многократных измерениях погрешность может быть снижена до 2—3%.

#### *Испытание магнитотвердых материалов без коммутации магнитного потока в образце*

При испытании м.т.м. без коммутации магнитного потока измеритель напряженности поля располагается у нейтрального сечения магнита, а измеритель индукции может находиться: на образце, в нейтральном его сечении, в зазоре магнитопровода, или у торца образца.

В первом случае измеряется непосредственно весь магнитный поток, проходящий через образец, в двух других — величина пропорциональная потоку образца. Индукционный метод с обмоткой для измерения индукции, помещенной на образец, применен в пермеамetre с флюксметром Штейнгровера, в установке, разработанной во ВНИИМ'е и в электронном ферротестере. Недостатками этих устройств являются длительность процесса испытания, невозможность автоматизации (для установок с флюксметром) и низкая точность, необходимость в низкочастотном генераторе значительной мощности (для электронного ферротестера). Кроме того, в обоих случаях необходимо наносить обмотку на испытываемый образец.

При расположении измерителя индукции в зазоре магнитопровода на него будут действовать потоки от образца и потоки от намагничивающих катушек. Кроме того, пропорциональность между потоком в зазоре и потоком в образце нарушается из-за наличия утечек магнитного потока вдоль магнитопровода и воздействия на измеритель остаточного намагничивания материала магнитопровода. Устранение действия потока намагничивающих катушек может быть достигнуто: 1. Уравновешиванием этого потока. 2. Выделением потока образца.

Метод измерения индукции с уравновешиванием потока намагничивающих катушек использован в пермеамetre Кепселя и в пермеамetre, разработанном в Институте электротехники АН УССР. Общими недостатками этих устройств являются: малая напряженность намагничивающего поля, недостаточная для намагничивания высококоэрцитивных сплавов; трудность обеспечения пропорциональности между потоком образца и потоком в измерительной щели из-за потоков рассеивания; возможность испытания образцов определенных размеров, значитель-

ные погрешности измерений (свыше 7,5% — для первого устройства и до 5% — для второго).

Устранение действия намагничивающих катушек путем выделения потока образца использовано в пермеамetre Штебляйна — Штейница. Выделение потока образца обеспечивается симметричной конструкцией двух половин магнитопровода и соответствующим включением намагничивающих катушек. Проверка симметрии устройства проводится при отсутствии образца и предполагается, что при внесении образца она не нарушается. Однако при наличии в воздушном зазоре образца магнитная симметрия нарушается, поскольку магнитная проницаемость воздуха и материала образца различны. Магнитная цепь с нерабочим зазором при испытании коротких образцов значительно шунтирует перемычку, в которой находится измеритель индукции, что вызывает перераспределение потоков. Все это приводит к значительным погрешностям измерения, достигающих при определении индукции до 5% и выше.

Расположение измерителя у торца образца было предложено в устройстве Штейнгровера. В этом случае отпадает необходимость в точном определении сечения образца, уменьшается влияние потоков рассеивания намагничивающих катушек на измеритель индукции, упрощается процесс измерения. Такое размещение измерителя является более рациональным, однако отсутствие данных о погрешностях метода потребовало проведения дополнительных исследований. Расположение измерителя между торцом образца и полюсным наконечником обуславливает наличие между ними воздушного зазора, что вызывает перераспределение индукции по длине образца и дополнительные потоки рассеивания у торца образца. Наличие воздушного зазора при размещении датчика у торца образца всегда вносит погрешность тем большую, чем короче образец и больше зазор. Этот способ может быть рекомендован при отбраковочном контроле идентичных по геометрической форме и близких по магнитным свойствам постоянных магнитов.

Проведенные исследования показали, что наиболее целесообразным является размещение датчика в зазоре между магнитопроводом и полюсным наконечником (рис. 2а). Величина воздушного зазора и длина полюсного наконечника выбираются такими, чтобы обеспечить равномерное поле в зазоре, где расположен измеритель. При таком расположении измерителя на него действует поток  $\Phi_m$ , создаваемый образцом и часть потока намагничивающих катушек  $\Phi_k$ , проходящих мимо образца по воздуху:

$$\Phi_{II} = \Phi_m - \Phi_k, \quad (4)$$

где:  $\Phi_{II}$  — поток, определяемый измерителем.



Кривая размагничивания, построенная по результатам измерения при таком расположении измерителя индукции, имеет вид кривой 1 (рис. 2б). Точка пересечения кривой 1 с осью абсцисс лежит значительно правее точки, соответствующей coercitive силе образца (кривая 4). Необходимо внести поправку в результаты измерения, что можно сделать, суммируя ординаты кривой 1 и кривой 3, выражающей изменение индукции  $B_k$ , соответствующей потоку  $\Phi_k$ . Получив в результате кривую 2, можно легко построить кривую 4, умножив ординаты

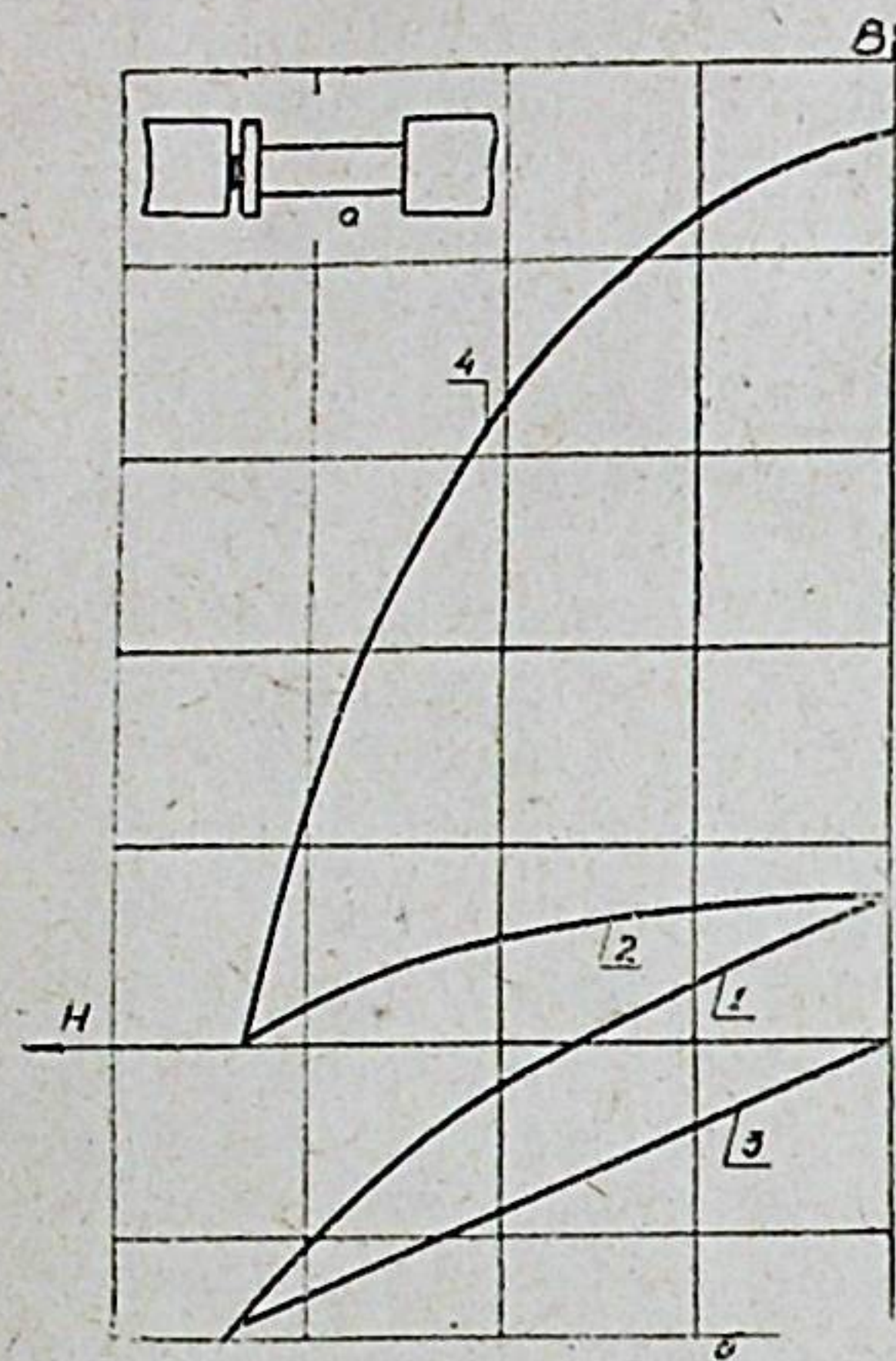


Рис. 2. б

первой на соотношение сечений полюсных наконечников и образца. Следовательно, индукция для любой точки кривой размагничивания магнита может быть найдена по формуле:

$$B_m = \frac{B_k S_k + B_n S_n}{S_m}, \quad (5)$$

где:  $S_k$  — часть сечения полюсного наконечника, через которую проходит поток катушек помимо образца:

$$S_k = S_n - S_m, \quad (6)$$

$S_n$  — сечение полюсного наконечника,  $S_m$  — сечение образца,  $B_m, B_n, B_k$ , — значения индукций, соответствующие указанным выше потокам.

Необходимость дополнительных измерений для нахождения индукции  $B_k$  и расчетных операций для определения индукции магнита  $B_m$  требует устранения влияния размагничивающих катушек. Влияние потока размагничивающих катушек на измеритель индукции может быть устранено либо путем его уравнивания с помощью потока, создаваемого дополнительными катушками, либо введением в измерительную схему коррекции определяемой величины, разработанной в данной работе. Последний способ обладает рядом существенных преимуществ:

1. не искажает и не ослабляет магнитного потока от основных катушек, что позволяет создать более экономичное устройство для испытания м.т.м.;
2. упрощает конструкцию намагничивающего устройства поскольку отсутствуют дополнительные катушки;
3. позволяет получить лучшую компенсацию влияния потока размагничивающих катушек, что повышает точность работы установки;

4. коррекция является более простой в настройке, стабильной во времени и удобной в эксплуатации.

Вследствие того, что погрешность определения индукции зависит от величины зазора, где расположен измеритель индукции, в качестве последнего была выбрана измерительная схема с датчиками Холла. В этом случае эдс датчика Холла пропорциональна измеряемой индукции. Тогда, переходя от индукции к эдс датчика Холла, выражение (5), можно преобразовать следующим образом:

$$e_x k_0 = e_{xm} - e_{xk} (k_0 - 1); \quad (7)$$

$$k_0 = \frac{S_n}{S_m},$$

где:  $e_x$  — эдс датчика Холла, расположенного в зазоре между магнитопроводом и полюсным наконечником,  
 $e_{xm}$  — составляющая эдс датчика Холла, обусловленная индукцией магнита,  
 $e_{xk}$  — составляющая эдс датчика Холла, обусловленная индукцией потока размагничивающих катушек, проходящего помимо магнита.

Откуда напряжение коррекции равно:

$$U_k = -e_{xk} (k_0 - 1). \quad (8)$$

В диссертации разработаны и исследованы схемы коррекции с помощью дополнительного датчика Холла, расположенного во вспомогательном электромагните; с помощью шунта, включенного в цепь размагниченных катушек; с помощью дополнительного датчика Холла, расположенного у поверхности образца.

Из рассмотренных схем лучшей является последняя, обладающая рядом существенных достоинств по сравнению с двумя первыми. Эта схема была использована при разработке устройства для испытания м.т.м.

На рис. 3 показано расположение основных элементов. Датчик для измерения напряженности поля 8 находится у поверхности образца 9, датчик для измерения индукции 10 находится в зазоре между магнитопроводом и полюсным наконечником, а датчик напряжения коррекции 7 у поверхности образца. Элементы схемы собраны в измерительном блоке 4. Отсчет измеряемых величин производится по приборам 5 и 6, проградуированным в единицах измеряемых величин. Намагничивание образца производится с помощью основных катушек 11.

Проведенные исследования показали, что значительное воздействие на датчик, помещенный в зазоре между магнитопроводом и полюсным наконечником, оказывают потоки рассеива-



ния размагничивающих катушек. Наличие зазора для размещения измерителя вызывает перераспределение индукции по длине образца. Для уменьшения погрешностей, обусловленных этими причинами, размагничивающие катушки 1 удалены от датчика и образца и расположены на боковых сердечниках магнитика и образца и расположены на боковых сердечниках магнитика и образца и расположены на боковых сердечниках магнитика и образца

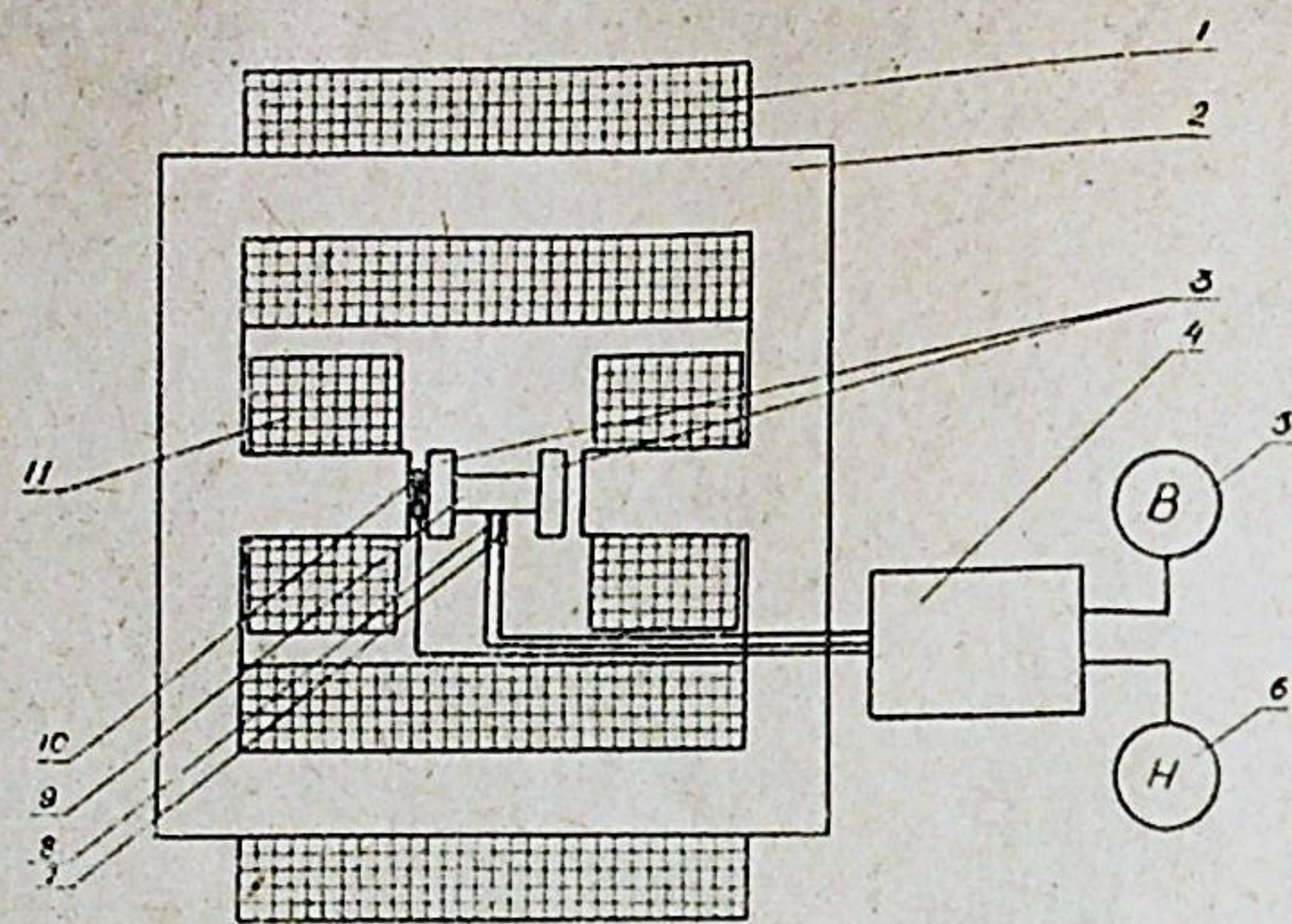


Рис. 3.

топровода 2, а для выравнивания индукции по длине образца введены два симметричных относительно образца зазора, причем величина зазора должна быть минимальной и не превышать 0,5 мм.

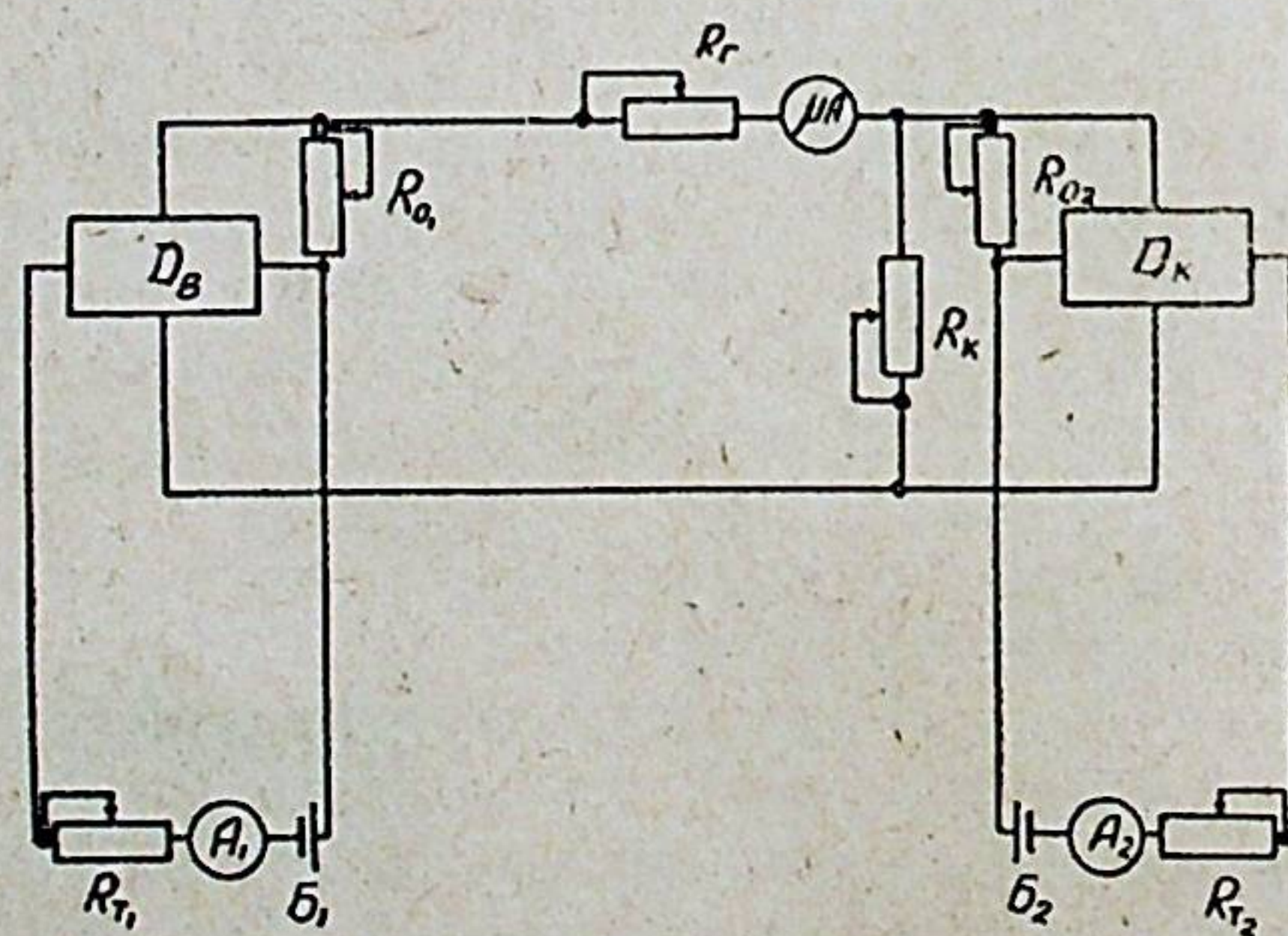


Рис. 4.

На рис. 4 приведена принципиальная схема для измерения индукции. Датчики включены последовательно, согласованно. Регулирующим элементом коррекции является сопротивление  $R_k$ , включенное параллельно холловским электродам датчика

коррекции и шунтирующее его выходное напряжение. Величина сопротивления  $R_k$  является основным параметром схемы коррекции и может быть определена из выражения:

$$R_k = \frac{e_{x_1} (k_0 - 1) R_{dk}}{e_{x_2} - e_{x_1} (k_0 - 1)}, \quad (9)$$

где:  $e_{x_1}$ ,  $e_{x_2}$  — эдс датчиков Холла, основного и дополнительного,  $R_{dk}$  — сопротивление дополнительного датчика.

Эта схема позволяет определять характеристики образцов разных по материалам, сечению и длине (в пределах 50—80 мм) без перестройки коррекции, все датчики можно питать переменным током и с помощью усилителей отсчет измеряемых величин производить по стрелочным приборам. Последняя схема позволяет непосредственно определять величину магнитной энергии. Схема измерения электрически не зависима от схемы пермеаметра и может быть выполнена в виде приставки к намагничивающему устройству.

Таким образом, рассмотренная схема измерения индукции в сочетании с измерением напряженности поля измерителем с датчиком Холла позволяет производить отсчет индукции, напряженности поля и магнитной энергии непосредственно по измерительным приборам, а в дальнейшем автоматизировать процесс измерения.

#### Намагничивающее устройство и источник питания

Намагничивающее устройство должно обеспечивать возможность намагничивания исследуемого образца до насыщения и проведения его испытания в замкнутой магнитной цепи в соответствии с выбранным методом измерения. В наибольшей мере этим требованиям удовлетворяет магнитная цепь, приведенная на рис. 3. Конструкция магнитной цепи намагничивающего устройства состоит из двух центральных сердечников сечением  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>, замыкающихся двумя П-образными боковыми сердечниками, сечением  $7 \times 10$  см<sup>2</sup>. Центральные сердечники жестко соединены с помощью специальных накладок с полюсными наконечниками длиной 5 см и сечением 100 см. Между полюсными наконечниками и центральными сердечниками имеются зазоры по 0,5 мм, для размещения датчика для измерения индукции. Центральные наконечники могут продольно перемещаться, что позволяет изменять рабочий зазор в пределах 0—10 см для испытания образцов разной длины. На средних сердечниках находятся основные намагничивающие катушки, позволяющие получить 60000 ав, на боковых сердечниках размещены вспомогательные катушки, создающие необходимое размагничивающее поле.



При разработке источника питания использована трехфазная двухполупериодная схема выпрямления с емкостным фильтром для сглаживания пульсации. Схема позволяет получить характеристики, имеющие наименьшую погрешность из-за пульсации выпрямленного тока. Разработанное намагничивающее устройство позволяет создавать в рабочем зазоре 50 мм намагничивающее поле от основных катушек до 400 ка/м и размагничивающее поле от вспомогательных катушек до 130 ка/м при длительных испытаниях и нормальном тепловом режиме. Устройство позволяет получать максимальное поле в зазоре 10 мм при квадратных полюсных наконечниках — 900 ка/м, при полюсных наконечниках специальной формы сечением 25 см<sup>2</sup> до 1600 ка/м.

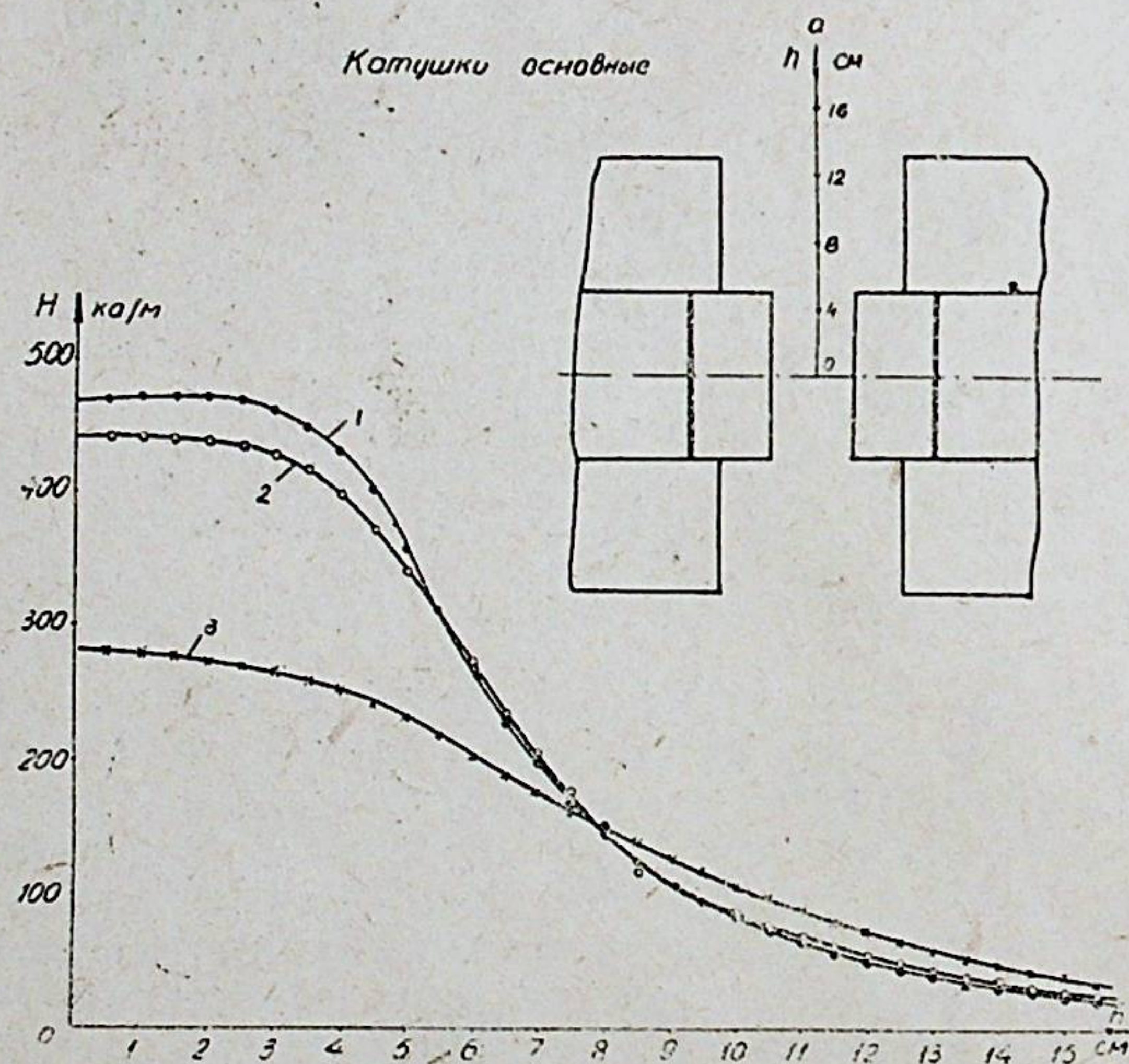


Рис. 5.

Неравномерность поля зависит от величины зазора, формы и геометрических размеров полюсных наконечников и величины напряженности поля.

На рис. 4 показано изменение напряженности магнитного поля по вертикальной оси  $a$  от центра зазора при одной и той же мдс основных катушек для зазора 38, 50, 100 мм — кривые 1, 2, 3. Как видно из графиков, наименее равномерное поле по сечению зазора будет при длине зазора 100 мм и наиболее равномерное — при 38 мм.

Проведенный электромеханический расчет показывает, что при больших значениях индукции при малых зазорах в устройстве развиваются большие электромеханические усилия (до 5500 н), что следует учитывать при испытании оксидных магнитов и разработке новых, еще более мощных устройств.

При выбранном методе испытания м.т.м. наиболее целесообразным является применение импульсного намагничивания с последующим размагничиванием от маломощного источника постоянного тока. Однако с метрологической стороны применение существующих импульсных установок требует дальнейших исследований.

#### Исследование разработанного устройства для испытания магнитотвердых материалов

Устройство для испытания м.т.м. состоит из намагничивающего устройства с блоком питания и измерительного устройства.

Конструктивно схема измерительного устройства выполнена в виде отдельного блока управления и выносных измерителей индукции и напряженности поля.

Схема измерения предусматривает отсчет измеряемых величин по приборам типа М 95 или по приборам типа М 24 с усилителями постоянного тока. Датчик для измерения напряженности поля и датчик коррекции являются идентичными и выполнены из монокристалла  $n=Ge$  марки ГЭС 2/0,5 с размерами  $3,0 \times 1,5 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>. Номинальный ток питания равен 15 ма. Датчик измерителя индукции изготовлен из монокристалла  $n-InAs$  с размерами  $3 \times 1,5 \times 0,5$  мм<sup>3</sup>. Номинальный ток питания 150 ма.

Линейность зависимости эдс Холла датчиков от величины напряженности поля и индукции в рабочем диапазоне измеряемых величин не нарушается. Чувствительность схемы измерения напряженности поля составляет 0,8 ка/м/дел, а схемы измерения индукции — 0,01 вб/м<sup>2</sup>/дел.

Погрешность измерения напряженности поля состоит из погрешности определения напряженности магнитного поля при калибровке измерителя  $\xi'_H$ , погрешности из-за неточности установки нуля прибора  $\xi_0$ , погрешности восстановления цены деления измерителя  $\xi_{ст}$  и погрешности показывающего прибора  $\xi_{пр}$ :

$$\xi_H = \xi'_H + \xi_0 + \xi_{ст} + \xi_{пр}. \quad (10)$$

Погрешность измерения индукции определяется погрешностью измерителя  $\xi_{Вн}$  и точностью установки напряжения коррекции  $\xi_k$ :

$$\xi_B = \xi_{Вн} + \xi_k. \quad (11)$$



Проведенный анализ погрешностей устройства для испытания м.т.м. показал, что при калибровке измерителей с помощью метода ядерного резонанса основная погрешность при измерении напряженности поля не превышает 1,5%, а при измерении индукции — 3,7%. При определении остаточной индукции, поскольку в этом случае напряжение коррекции равно нулю, погрешность измерения индукции снижается до 1,5%.

Экспериментальные исследования разработанного устройства для испытания магнитотвердых материалов проводились путем сравнения характеристик, полученных на данном устройстве, с характеристиками, полученными при многократных измерениях с помощью импульсно-индукционного метода.

С целью выяснения влияния на погрешность измерения геометрических размеров и магнитных свойств образцов, исследования проводились с образцами длиной от 3,0 см до 10,0 см при сечении, равном 2,38 см<sup>2</sup> и сечением от 1,63 см<sup>2</sup> до 8,15 см<sup>2</sup> при длине образцов — 5 см с коэрцитивной силой от 14,4 ка/м до 52,0 ка/м и остаточной индукцией от 0,57 вб/м<sup>2</sup> до 1,25 вб/м<sup>2</sup>. В процессе исследования проводилась оценка погрешностей определения коэрцитивной силы, остаточной индукции и сравнивались кривые размагничивания материалов. Установлено, что во всех случаях расхождение в определении коэрцитивной силы не превышает 2,5%, а остаточной индукции — 3%.

Сравнение экспериментальных кривых размагничивания приведено на рис. 6 для образцов с коэрцитивной силой 40 ка/м и 28 ка/м. Кривые 1, 3 определялись импульсно-индукционным методом, кривые 2, 4 — на разработанном устройстве. Как видно из приведенных графиков, кривые совпадают в пределах точности измерений. Следует отметить, что при работе на установке с датчиками Холла наблюдается значительно меньший разброс точек в процессе измерения, чем в случае определения характеристик импульсно-индукционным методом.

На основании исследований, проведенных в диссертационной работе, можно сделать следующие выводы:

1. Появление новых высококоэрцитивных сплавов, их широкое применение в различных устройствах измерительной техники и автоматики повышают требования к аппаратуре для испытания магнитотвердых материалов. Современная аппаратура должна обеспечивать возможность испытания магнитотвердых сплавов с коэрцитивной силой до 130 ка/м и выше с точностью, достаточной для качественного анализа магнитных материалов и проектирования магнитных систем. При этом время испытания должно быть минимальным, что может быть обеспечено при непосредственном отсчете измеряемых величин и автоматизации процесса измерения.

2. При испытании магнитотвердых материалов импульсно-индукционным методом возникают погрешности, связанные с не-

обходимостью коммутации сильных магнитных полей, из-за чего значительно возрастает общая погрешность измерения, которая при определении характеристик современных высококоэрцитивных сплавов может достигать значительной величины. Реальные погрешности устройств, использующих этот метод, могут достигать при определении коэрцитивной силы до 6%, а при определении остаточной индукции до 8% и выше. Кроме того, этот метод обладает рядом существенных недостатков: длительность испытания и обработка результатов измерения, отсутствие непосредственного отсчета измеряемых величин, необходимость коммутации больших магнитных полей и невозможность автоматизации процесса измерений.

3. Установлено, что с точки зрения уменьшения погрешности измерения в безкоммутационных устройствах наиболее целесообразно размещать измеритель индукции в зазоре между магнитопроводом и полюсным наконечником.

4. При выбранном расположении измерителя индукции на него, помимо основного потока образца, действует поток намагничивающих катушек, влияние которого на измеритель индукции может быть скомпенсировано либо уравнивающим потоком, создаваемым дополнительными катушками, либо введением электрической коррекции измеряемой величины. Последний способ обладает рядом существенных достоинств. Предложены и проанализированы три схемы электрической коррекции измеряемой величины и даны рекомендации по их практическому применению.

5. Разработанные схемы для измерения индукции и напряженности поля с применением датчиков Холла позволяют наиболее полно использовать возможности измерительной установки для повышения точности испытания, получить непосредственный отсчет измеряемых величин.

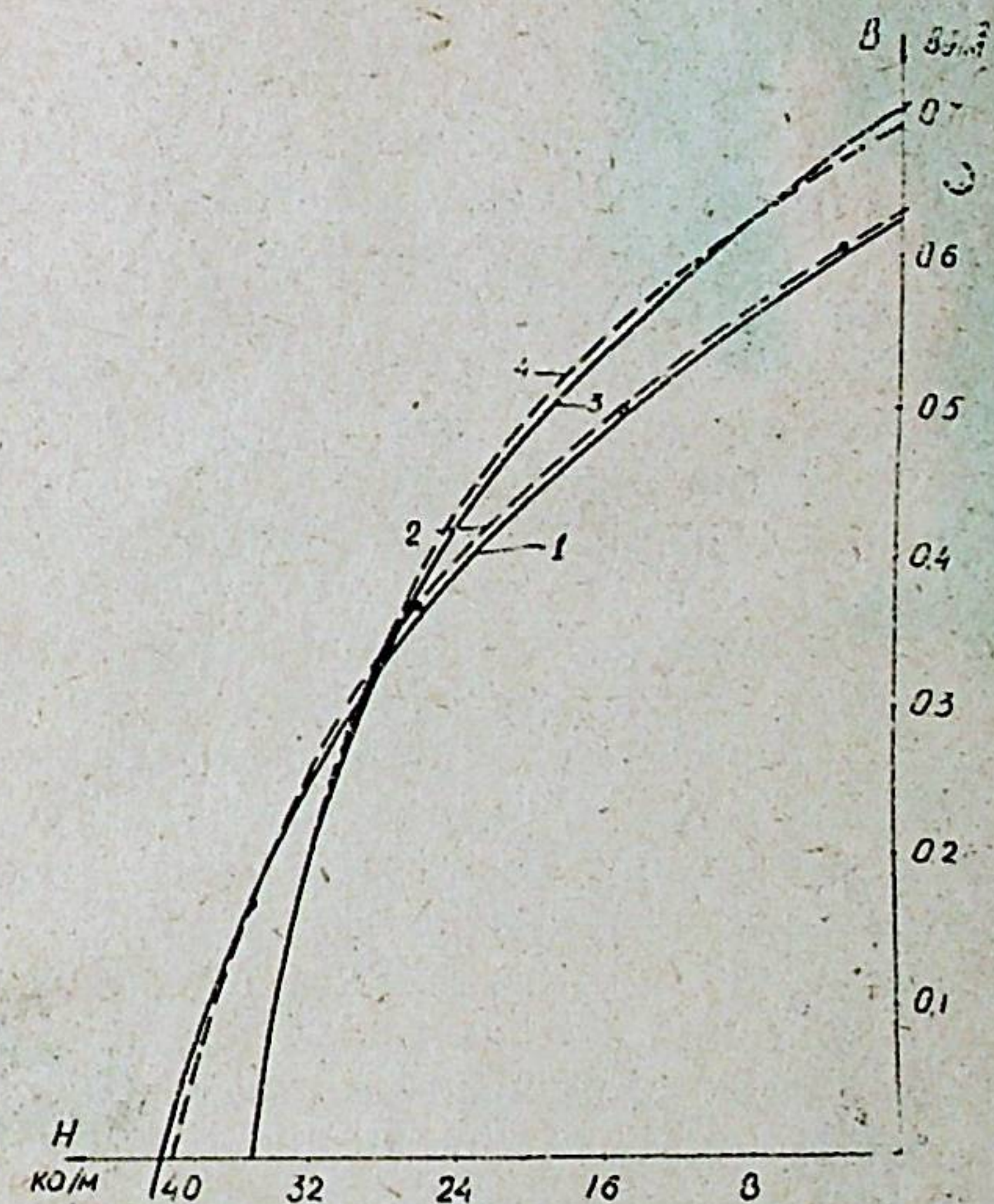


Рис. 6.



6. Погрешность измерения индукции зависит от величины зазора, в котором расположен измеритель, а также от взаимного расположения размагничивающих катушек измерителя и образца. Для получения необходимой точности измерения величина зазора не должна превышать 0,5 мм, а размагничивающие катушки должны быть достаточно удалены от измерителя и образца. Расстояние между образцом и измерителем должно быть таким, чтобы обеспечить равномерное распределение индукции образца по сечению зазора, где расположен измеритель.

7. Разработанная установка позволяет получать все основные характеристики магнитотвердых материалов с минимальной затратой времени для измерения. В рабочем зазоре, равном 50 мм, может быть получена при намагничивании образца напряженность магнитного поля до 410 кА/м, а при размагничивании — до 130 кА/м, что обеспечивает возможность испытания образцов длиной 50 мм с коэрцитивной силой до 130 кА/м. В зазоре 10 мм напряженность поля может быть достигнута 900 кА/м, а с применением полюсных наконечников специальной формы до 1600 кА/м.

8. В процессе создания устройства для испытания магнитотвердых материалов разработана конструкция намагничивающего устройства и проведено его исследование в различных режимах работы, разработана конструкция измерительного блока с датчиками Холла для определения характеристик магнитотвердых материалов без коммутации магнитного потока с непосредственным отсчетом измеряемых величин. Проанализированы погрешности разработанного устройства и приведены результаты экспериментальных исследований.

9. При калибровке измерителей при помощи метода, основанного на ядерном резонансе, погрешность измерения напряженности поля для точек кривой размагничивания не превышает  $\pm 1,5\%$ , а погрешность измерения индукции —  $\pm 3,7\%$ . При определении остаточной индукции погрешность измерения индукции может быть снижена до  $\pm 1,5\%$ . Расхождение результатов испытания, полученных на разработанной установке и на установке с применением импульсно-индукционного метода не превышает  $\pm 2,5\%$  при определении коэрцитивной силы, а при определении остаточной индукции —  $\pm 3\%$ .

10. Разработанная установка позволяет применить импульсное намагничивание образца и его плавное размагничивание от маломощного источника постоянного тока с целью уменьшения габаритов установки и повышения экономичности намагничивающего устройства.

На основании проведенных теоретических исследований были разработаны две установки для испытания магнитотвердых

материалов, одна из которых изготовлена и проходит опытную проверку в Институте электродинамики АН УССР, а вторая — во Львовском политехническом институте.

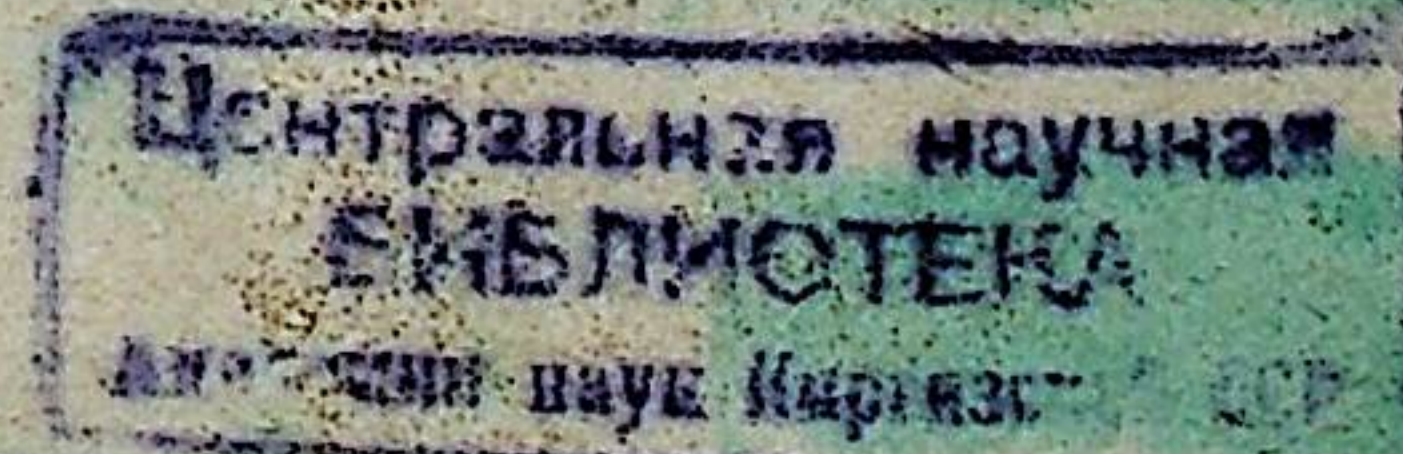
По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Усатенко С. Т., Февралева Н. Е. Распределение напряженности поля и магнитной индукции по длине магнита, замкнутого магнитопроводом, сб. «Вопросы магнитных измерений», изд. АН УССР, 1961.

2. Усатенко С. Т. О выборе материалов постоянных магнитов для магнитных систем, сб. «Вопросы магнитных измерений», изд. АН УССР, 1961.

3. Усатенко С. Т. Устройство для измерения индукции постоянных магнитов, «Бюллетень изобретений и товарных знаков», № 13, 1963.

4. Усатенко С. Т. Измерение индукции в пермеамetre с помощью датчиков Холла, «Заводская лаборатория», № 5, 1964. Результаты работы были доложены на Республиканском научно-техническом совещании по вопросам испытания магнитных материалов и производства магнитноизмерительной аппаратуры (15—16 декабря 1960 г., Киев).



БФ 04826. Зак. № 1650у. Тираж 210. Формат бумаги 60×92<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Физич. печ. лист. 1. Условн. печ. лист. 1. Бум. лист. 0,5. Подписано к печати 27.V 1964 г.

Киевская книжная типография № 5 Госкомитета Совета Министров УССР по прессе. Киев, ул. Рейниа, 4.