

Х. Ю. ОРУ

**О ЗАВИСИМОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ
ОТ ФАЗЫ РАЗМЫКАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

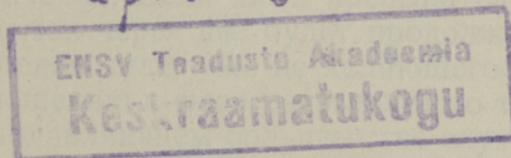
Er. 6.7

TALLINNA POLÜTEHNILISE INSTITUUDI TOIMETISED
ТРУДЫ ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
Серия А. № 95 1957

Х. Ю. ОРУ

О ЗАВИСИМОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ
ОТ ФАЗЫ РАЗМЫКАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Er-938



ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТАЛЛИНСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА
ТАЛЛИН 1957

О ЗАВИСИМОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ ОТ ФАЗЫ РАЗМЫКАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. ВВЕДЕНИЕ

При магнитном дефектоскопировании одной из наиболее важных операций оказывается создание достаточно большой остаточной намагниченности в исследуемом образце. Наиболее простым по идее способом создания остаточной намагниченности в ферромагнитных телах является воздействие на них достаточно сильного постоянного поля, создаваемого посредством постоянного тока. Однако в практических условиях переменный ток является более доступным, особенно в тех случаях, когда по условиям задачи требуется большая сила намагничивающего тока.

Несмотря на весьма широкое практическое применение дефектоскопов, где остаточная намагниченность создается непосредственно техническим переменным током, в литературе появилось весьма мало экспериментальных исследований о работе таких установок, которые могли бы послужить основой для полной теории их работы.

Если бы при выключении переменного тока он в момент срабатывания прерывателя сразу же падал до нуля, то, — так как моменты срабатывания в отношении фазы переменного тока являются чисто случайными, — мы при многократном повторении опыта получили бы любые значения остаточной намагниченности, от нуля до некоторого максимального значения. Если же в прерывателе тока образуется дуга, то ток через нее будет продолжаться до момента прекращения дуги, уже не являющегося чисто случайным по отношению к фазе разрываемого тока. Вследствие этого в подавляющем большинстве случаев в ферромагнитных образцах создается остаточная намагниченность, достаточная для дефектоскопических целей [1, 2].

Однако при некоторых условиях получается остаточная намагниченность, далеко недостаточная для дефектоскопи-

ческих целей. Дефекты в таких образцах останутся невыявленными. Если эти образцы являются весьма ответственными деталями, то такая неуверенность проверки вообще недопустима, а сам магнитный метод в этом случае полностью теряет свою ценность.

Выяснению причин и условий возникновения малой остаточной намагниченности посвящена работа А. В. Альтма и Р. И. Януса [3, 4]. Они исследовали работу намагничивающего устройства, где намагничивающая цепь была подключена к вторичной обмотке трансформатора. Выключатель тока находился в первичной цепи. Существенной особенностью такого устройства является некоторый сдвиг фазы между током, намагничивающим тело, и током, прерываемым разрывателем.

Вопрос, которому упомянутые исследователи уделяли основное внимание, заключался в следующем: переходит ли вторичный (т. е. намагничивающий) ток i_2 через нуль к моменту, когда гаснет электрическая дуга между контактами? И если переходит, то до каких значений он может нарасти и от каких факторов это явление зависит. Условимся впредь это явление коротко называть переходом вторичного тока через нуль. Решение этого вопроса имеет большое практическое значение, так как переход вторичного тока через нуль ослабляет намагниченность, которая была создана предыдущей полуволной.

Во-первых, А. В. Альтма и Р. И. Янус исследовали этот вопрос теоретически в двух случаях: 1) при продольном намагничивании и 2) при циркулярном намагничивании.

Они установили, что в случае циркулярного намагничивания, когда во вторичной цепи трансформатора доминирует активное сопротивление, должен происходить переход вторичного тока i_2 через нуль. Во-вторых, они исследовали этот вопрос и экспериментально; но на осциллограммах, которые они получили, заметных переходов вторичного тока через нуль не было обнаружено. Причиной такого расхождения между теоретическими и экспериментальными результатами, как отмечают авторы работы, была весьма низкая собственная частота использованных при исследовании шлейфовых осциллографов. Поэтому в настоящей работе и сделана попытка выяснить экспериментальным путем: переходит ли вторичный ток через нуль или нет, и если переходит, то до каких значений он может нарасти и от каких факторов этот переход зависит.

Кроме того в работе изучается зависимость остаточной намагниченности от параметров процесса размыкания, а в особенности от величины перехода вторичного тока через нуль и от сорта стали, из которого образец сделан.

2. АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения заданных скоростей размыкания была сконструирована специальная установка, представляющая два параллельных вертикальных столба, в пазах которых могла свободно скользить тяжелая пластина. Падая с заданной высоты, пластина ударяла о рычаг прерывателя. Скорость разведения контактов зависела от скорости пластины в момент удара и длины плеча рычага, которую можно было также регулировать.

Наряду с описанным прерывателем использовался также прерыватель, который позволял начинать процесс прерывания тока при определенных фазах первичного тока, с точностью около 5° . Для этого был использован синхронный мотор, на вал которого был насажен массивный диск с одним зубцом. Прерыватель приводился в действие ударом зубца. Фаза момента размыкания устанавливалась поворотом статора мотора.

Для одновременного наблюдения кривых тока и напряжения при процессах размыкания применялся двухлучевой катодный осциллограф с автоматическим включением катодного луча. Луч включался примерно за один период до момента размыкания и выключался примерно через полпериода после прекращения тока. Таким образом на осциллограммах всегда имелись амплитуды стационарного тока.

Осциллограммы снимались фотоаппаратом на кинопленку.

При работе применялись трансформаторы с разными параметрами:

1) трансформатор на напряжение в первичной обмотке 220 в, с выводами вторичной обмотки на 5, 10, 25, 50 и 110 в. Номинальная мощность 4 ква. Средняя (по поперечному сечению) амплитуда индукции в сердечнике $B_{\text{макс}} = 10000$ гаусс, ток холостого хода $J_0 = 0,47$ а, потери холостого хода $P_0 = 64$ вт.

2) трансформатор печи Таммана: первичное напряжение 220 в; вторичное напряжение 10 в; номинальная мощ-

ность 4 ква, $B_{\text{макс}} = 11000$ гаусс, ток холостого хода $J_0 = 1,15$ а, потери холостого хода $P_0 = 50$ вт.

3) трансформатор, у которого вторичная обмотка состояла только из одного витка из толстого медного кабеля. Первичное напряжение 220 в. Мощность 5 ква. $B_{\text{макс}} = 9000$ гаусс, ток холостого хода $J_0 = 1,2$ а, потери холостого хода $P_0 = 96$ вт.

Сила намагничивающих токов колебалась от 10 до 2000 ампер. На осциллограф подавалось падение напряжения на включенном в намагничивающую цепь активном сопротивлении, пропорциональное силе тока.

В первой стадии работы изучалась только геометрическая форма кривых токов во время процесса выключения тока. Снимки производились сериями с разными фазами. Во второй стадии изучалась зависимость остаточной намагниченности от параметров процесса выключения, от материала и геометрической формы образца. На этом этапе работы фотографировалась кривая тока размыкания и измерялась полученная остаточная намагниченность. При соленоидальном (продольном) методе намагничивания применялись в основном образцы цилиндрической формы. Остаточная намагниченность измерялась баллистическим гальванометром при выдергивании образца из измерительной катушки. Образцами при циркулярном намагничивании являлись кольца и трубки, которые надевались на проводник с намагничивающим током. Остаточная намагниченность определялась методом снятия петли гистерезиса. Для этого на кольца наматывались две обмотки: одна для намагничивания образца постоянным током, другая — для измерения потока индукции.

3. ПЕРЕХОД ВТОРИЧНОГО ТОКА ТРАНСФОРМАТОРА ЧЕРЕЗ НУЛЬ ПРИ ВЫКЛЮЧЕНИИ ПЕРВИЧНОГО ТОКА

Как известно, сдвиг фаз между первичным током i_1 и вторичным током i_2 трансформатора меньше чем 180° на небольшой угол φ_{12} , так что фаза тока — i_2 опережает фазу тока i_1 на угол φ_{12} . Следовательно, если при процессе выключения первичный ток прекращается при первом достижении значения нуль (дуга гаснет), то вторичный ток i_2 несколько раньше проходит через нуль, достигает значения $J_{2к}$ и только с момента прекращения первичного тока

начинает асимптотически приближаться к нулю. Этот переход вторичного тока через нуль при намагничивании нежелателен, так как он уменьшает ту остаточную намагниченность, которая была создана последней полувольтной намагничивающего тока.

Практиками-дефектоскопистами неоднократно отмечалось обстоятельство, что дефектоскопы, имеющие промежуточный трансформатор, создают в каждом образце достаточную намагниченность только при условии, что материал образцов имеет сравнительно большую коэрцитивную силу H_c (не менее 5—8 эрстед). В образцах из магнитно-мягких материалов величины остаточных намагниченностей иногда оказываются настолько малыми, что магнитный порошок не дает четкого осадка даже на весьма грубых трещинах и тому подобных опасных дефектах. Неизбежность низких остаточных намагниченностей при низких значениях коэрцитивной силы при намагничивании в открытой магнитной цепи элементарно ясна и это обстоятельство неоднократно привлекалось для «объяснения» низких значений остаточной намагниченности также при условиях циркулярного намагничивания. Однако при циркулярном намагничивании коэффициент размагничивания — нуль, вследствие чего простая аналогия с открытой магнитной цепью теряет свою основу. А. Альтма и Р. Янус высказали по этому вопросу мнение, что указанное явление возможно происходит по следующим причинам: если мы имеем два материала с приблизительно одинаковым магнитным насыщением, но один из них с высокой коэрцитивной силой (H'_c), а другой — с низкой (H''_c) и перемагничиваем их циклически при одних и тех же значениях $H_{\text{макс}}$ (что даст близкие $B_{\text{макс}}$, если $H'_c \ll H_{\text{макс}}$), то петля гистерезиса для материала с меньшей коэрцитивной силой (H''_c) будет более узкой и крутобокой (рис. 1).

В нем обратное поле — $H_{\text{обр}}$ (при переходе тока через нуль) вызывает большее относительное уменьшение остаточной индукции b_r , чем в случае высококоэрцитивного материала (b_r — остаточная индукция по неопределенным гистерезисным петлям). Следовательно в изделиях с более низким H_c могут быть получены недопустимо низкие значения остаточной намагниченности. Это теоретическое предсказание названных авторов экспериментальным исследованием полностью подтвердилось. Вредное влияние

на величину остаточной намагниченности перехода вторичного тока i_2 через нуль для магнитно-мягких материалов можно уменьшить, уменьшая $H_{\text{макс}}$. Нужно выбрать $H_{\text{макс}}$ минимальным из тех значений, которые дают значения b_r близкие к B_r . Всякое увеличение выше минимально-необходимого $H_{\text{макс}}$ не только бесполезно, но и вредно, так как оно увеличивает число случаев с низким b_r .

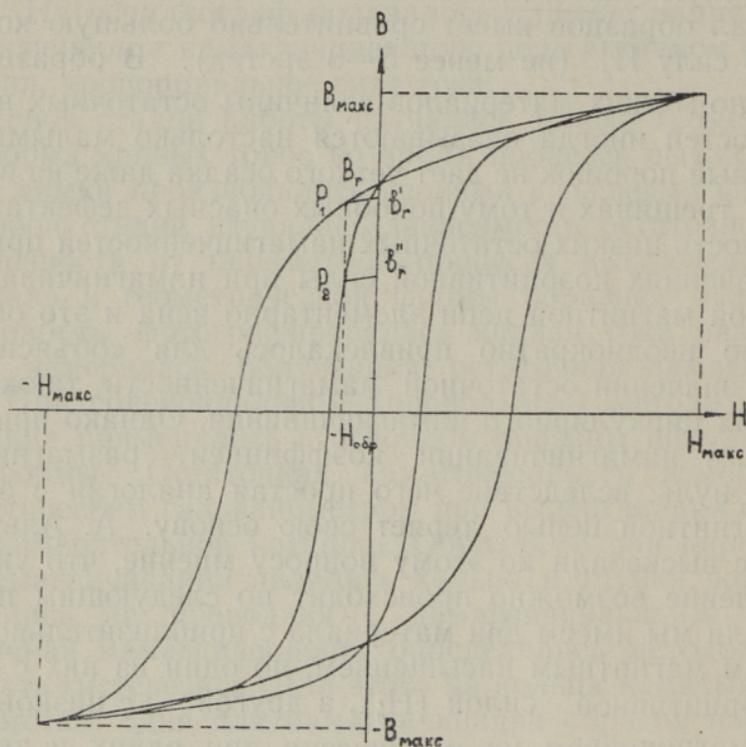


Рис. 1

Если размыкание контактов в первичной цепи происходит несколько раньше, чем вторичный ток достигает максимума, то этот максимум, т. е. амплитуда последней полуволны вторичного тока J_{2a} будет меньше амплитуды вторичного тока в стационарном режиме $J_{2\text{макс}}$, так как в дуге размыкания расходуется некоторая часть энергии. Очевидно, что и это явление оказывает влияние на получаемую остаточную намагниченность, но в настоящей работе это влияние не рассматривается.

Величина $J_{2к}$, до которой нарастает вторичный ток после

перехода через нуль, зависит и от амплитуды последней полуволны J_{2a} . Поэтому для характеристики величины перехода целесообразно ввести относительную величину $\eta = \frac{J_{2k}}{J_{2a}}$. Эти величины будут сравнимы при намагничивающих токах разной силы.

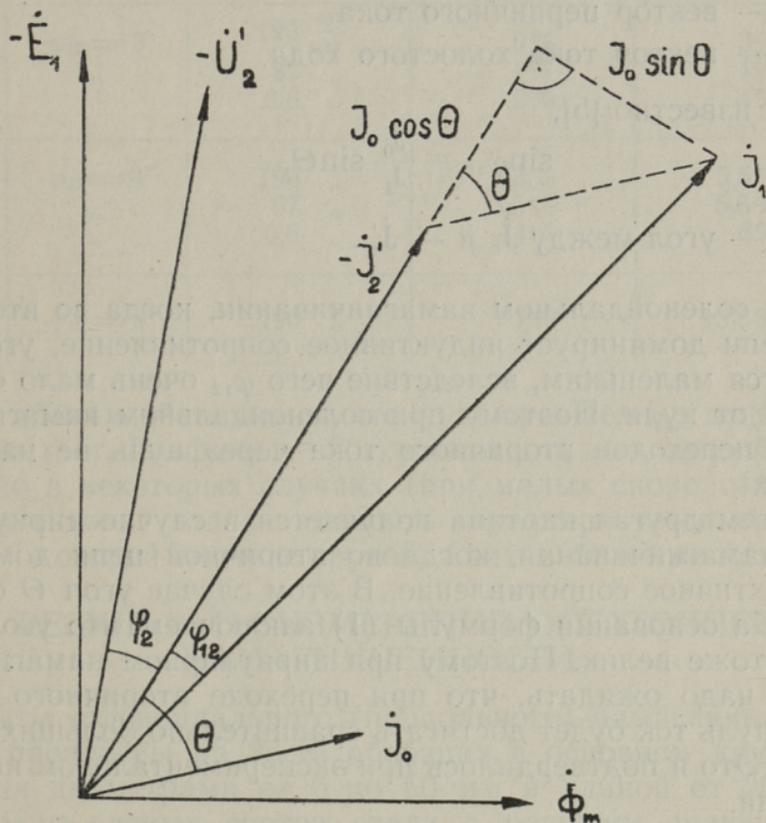


Рис. 2

Величина η зависит в основном от трех факторов:

1) от сдвига фазы между первичным током i_1 и вторичным током i_2 или между i_1 и $-i_2$, который мы обозначили φ_{12} . С увеличением φ_{12} η также возрастает;

2) от фазы первичного тока a в момент начала размыкания,

3) от скорости размыкания v .

Чтобы выяснить, от каких факторов зависит φ_{12} , рассмотрим векторную диаграмму трансформатора (рис. 2).

Обозначения на диаграмме:

\dot{E}_1 — вектор индуцированный э. д. с. в первичной обмотке.

\dot{U}'_2 — вектор приведенной величины напряжений вторичной обмотки.

\dot{J}'_2 — вектор приведенной величины вторичного тока.

\dot{J}_1 — вектор первичного тока.

\dot{J}_0 — вектор тока холостого хода.

Как известно [5],

$$\sin \varphi_{12} = \frac{J_0}{J_1} \sin \Theta, \quad (1)$$

где Θ — угол между \dot{J}_0 и $-\dot{J}'_2$.

При соленоидальном намагничивании, когда во вторичной цепи доминирует индуктивное сопротивление, угол Θ является маленьким, вследствие чего φ_{12} очень мало отличается от нуля. Поэтому при соленоидальном намагничивании переходов вторичного тока через нуль не наблюдается.

Совсем другая картина получается в случае циркулярного намагничивания, когда во вторичной цепи доминирует активное сопротивление. В этом случае угол Θ большой. На основании формулы (1) заключаем, что угол φ_{12} будет тоже велик. Поэтому при циркулярном намагничивании надо ожидать, что при переходе вторичного тока через нуль ток будет достигать сравнительно больших значений. Это и подтвердилось при экспериментальном исследовании.

При соленоидальном методе можно также получить сравнительно большие переходы вторичного тока через нуль. Для этого во вторичную цепь надо включить большое активное сопротивление так, чтобы оно было в цепи доминирующим.

Как видно из формулы (1), величина φ_{12} зависит также от отношения тока холостого хода к первичному току при нагрузке.

Чем на более ранней фазе, т. е. ближе к нулевой фазе, начинается выключение тока, тем меньше получается величина η . Но с уменьшением α длина дуги возрастает; поэтому можно сказать: чем длиннее оказывается дуга при размыкании первичного тока, тем меньшее значение

будет иметь величина η . Так как при больших скоростях размыкания длина дуги получается большая, то в этом случае величина η получается меньшей. Сказанное иллюстрирует следующая таблица:

№	φ_{12}	v $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$	η	
			α близко 0°	α близко 180°
1	$\varphi_{12} = 3^\circ$	190 $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$	0%	3%
	„	67 „	1%	4%
	„	0,6 „	2%	4%
2	$\varphi_{12} = 4^\circ$	190 „	1,5%	5,5%
	„	67 „	3,5%	5,5%
	„	0,6 „	4%	6%
3	$\varphi_{12} = 6^\circ$	190 „	7%	13,5%

Из таблицы убеждаемся, что с увеличением φ_{12} величина η возрастает. Графики $\eta = f(\alpha)$ имеют вид восходящей прямой, но в некоторых случаях (при малых скоростях размыкания тока) эта зависимость характеризуется кривой, подъем которой вначале крутой, а затем более пологий.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Опыты соленоидального (продольного) намагничивания были проведены на 35-ти образцах в основном круглого сечения диаметрами от 6 до 50 мм и длиной от 200 до 600 мм из разных сортов стали с разными значениями коэрцитивной силы H_c (в частности, были применены образцы из пермаллоя и альнико).

Длина соленоида обычно выбиралась примерно в полтора раза больше длины образца. В намагничивающую цепь включалось активное сопротивление, чтобы наблюдались переходы вторичного тока через нуль. Это активное сопротивление служило и для получения напряжения, ход которого показывал на экране катодного осциллографа и ход тока.

Из опытов с тонкими стержнями, диаметр которых меньше 1 см, выяснилось, что при сильных намагничивающих полях ($H_{\text{макс}} = 500$ до 1000 эрстед) кажущаяся оста-

точная индукция b_r при увеличении α от 0° до 180° в общем уменьшается. Это явление можно объяснить либо переходом вторичного тока через нуль, либо действием вихревых токов («эффект Вальтенгофена») [6, 7]. Для выяснения этого вопроса были изготовлены образцы из проволок и жестяных полосок по возможности с такой же коэрцитивной силой, как и сплошные образцы. Опыты не показали заметного изменения зависимости b_r от α по сравнению со сплошными образцами. Это указывает, что вихревые токи при проведенных опытах решающего влияния не имели.

Далее приводятся некоторые иллюстрирующие примеры результатов, полученных при продольном намагничивании в соленоиде.

а) Образец из магнитно-мягкой стали ($H_c = 3,75$ эрстед), диаметр $d = 12$ мм, длина $l = 30$ см. Напряженность намагничивающего поля $H_{\text{макс}} = 900$ эрстед. При изменении α от 0° до 180° величина η увеличивалась от 0,5% до 13%, причем при нарастании величины η от 0,5% до 3,5% получаемая кажущаяся индукция b_r уменьшалась от 34 до 0 условных единиц, а в интервале от 3,5% до 13% b_r имела уже противоположный знак и с ростом η увеличивалась от 0 до 60 условных единиц.

При намагничивающем поле $H_{\text{макс}} = 120$ эрстед зависимость величины b_r от α имеет уже другой характер. При увеличении α от 0° до $\sim 90^\circ$ b_r изменяется от 62 до 69 условных единиц. При дальнейшем увеличении α от 90° до 180° b_r остается почти постоянной. Такой характер зависимости b_r от α объясняется тем, что при относительно слабых намагничивающих полях переход вторичного тока через нуль не вызывает заметного уменьшения остаточной индукции b_r , так как петля гистерезиса относительно широкая. В этих условиях уменьшение обусловлено в основном уменьшением амплитуды последней полуволны тока.

б) Образец квадратного сечения с длиной стороны 15 мм из трансформаторной жести толщиной 0,5 мм. Длина образца $l = 25$ см, $H_{\text{макс}} = 900$ эрстед. В этом образце уже при значении $\eta = 0,1\%$ b_r получилась с обратным знаком.

в) цилиндрический образец из альнико. Диаметр $d = 18$ мм, длина $l = 25$ см. При намагничивающем поле $H_{\text{макс}} = 1400$ эрстед и изменении η от 0 до 15% замечается лишь уменьшение b_r от 1200 до 1060 условных единиц. Обратной намагниченности вообще не получалось.

Все эти результаты находятся в хорошем согласии с теоретическими соображениями Альтма и Януса.

Далее приводим иллюстрирующие примеры результатов, полученных при циркулярном намагничивании:

а) образец: трубка из среднеуглеродистой стали $H_c = 7,3$ эрстед. Длина трубки 75 мм, внешний диаметр 50 мм, внутренний диаметр 35 мм. Среднее значение намагничивающего поля $H_{\text{макс}} = 100$ эрстед. При изменении α от 0° до 180° b_r уменьшается от 452 до 438 условных единиц.

б) образец: кольцо из спирально намотанной ленты. Материал ленты: пермаллой. Ширина ленты: 26 мм. Внешний диаметр кольца: 80 мм, внутренний диаметр 34 мм., толщина слоя: 23 мм. Среднее значение намагничивающего поля $H_{\text{макс}} = 100$ эрстед. В сравнении с предыдущим образцом зависимость b_r от α получается иная: при увеличении α от 0° до 20° b_r уменьшался от 60 до 0 (в условных единицах); при увеличении α от 20° до 180° b_r получает обратный знак и увеличивается от 0 до 78 условных единиц. Для этого магнитно-мягкого образца переход вторичного тока через нуль, как видно, сильно влияет на остаточную намагниченность.

Одна серия опытов была проведена на образце, который представлял кусочек трубки из магнитно-мягкого материала и имел волосовину вдоль образующей. Намагничивание производилось циркулярным методом. Исследовалась зависимость $M=f(\eta)$, где M — количество магнитного порошка, который оседал на волосовину трубки после намагничивания в определенных условиях. Выяснилось, что при увеличении величины η от 0 до 1,5% вес осевшего порошка уменьшается от 410 мг до 0 мг. При увеличении η от 1,5% до 14% вес осевшего порошка увеличился от 0 до 630 мг. Направление остаточной индукции при этом было противоположно направлению индукции, получавшейся при $\eta < 1,5\%$.

Литература.

1. В. А. Воскресенский. Метод получения мгновенных импульсов тока большой силы и применение этого метода для намагничивания постоянных магнитов. «Электричество», 1927. № 5.
2. В. С. Меськин. Ферромагнитные сплавы. 1937.
3. А. В. Альтма и Р. И. Янус. О наведении остаточной намагниченности переменным током. ЖТФ 1947 г., том XVII, вып. 2.
4. А. В. Альтма и Р. И. Янус. Исследование работы намагничивающего устройства переменного тока реманенц-дефектоскопа. ЖТФ, 1947 г. том XVII, вып. 2.
5. Г. Н. Петров. Электрические машины. Часть I. 1956.
6. В. К. Аркадьев. Электромагнитные процессы в металлах. Часть II. 1936.
7. J. L. Snoek. The Influence of Eddy Currents of the Apparent Hysteresis Loop of Ferromagnetic Bars, Physica, VIII, № 4, 1941.

Х. Ю. Ору

О ЗАВИСИМОСТИ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ
ОТ ФАЗЫ РАЗМЫКАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Издательство

Таллинского Политехнического Института

*

Редактор Г. Метс

Технический редактор А. Тамм

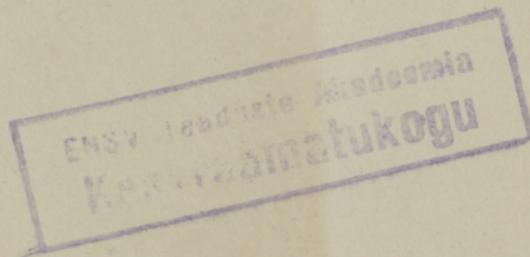
Корректор Ы. Каар

Сдано в набор 8. II 1957. Подписано к печати 1. III 1957. Бумага $54 \times 84 \frac{1}{16}$. Печатных листов 1,0. По формату 60×92 печатных листов 0,82. Учетно-издательских листов 0,62. Тираж 800. МВ-00686.

Заказ № 825.

Типография «Коммунист». Таллин, ул. Пикк 2.

Цена 45 коп.



45 коп.