

**Авторы:**

к.т.н. Дегтярев А.А.,  
д.т.н. Кузечков С.Л.,  
ООО НПФ «Квазар»,  
г. Новочеркасск, Россия,  
к.т.н. Дони Н.А.,  
к.т.н. Шурупов А.А.,  
ООО НПП «ЭКРА»,  
г. Чебоксары, Россия.

Ph.D. Degtyarev A.A.,  
D.Sc. Kuzhekov S.L.,  
NPF Kvazar,  
Novocherkassk, Russia,  
Ph.D. Doni N.A.,  
Ph.D. Shurupov A.A.,  
EKRA RPE Ltd,  
Cheboksary, Russia.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ МАГНИТНЫХ ИНДУКЦИЙ В ТОРОИДАЛЬНЫХ СЕРДЕЧНИКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА КЛАССА Р ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

## DETERMINATION OF REMANENT MAGNETIC INDUCTIONS IN TOROIDAL CORES OF CLASS P CURRENT TRANSFORMERS FOR RELAY PROTECTION

Аннотация: выполнен анализ существующих подходов к определению коэффициента остаточной магнитной индукции в тороидальных сердечниках трансформаторов тока (ТТ) для релейной защиты (РЗ). Разработана методика и выполнен расчет параметров физической модели ТТ класса Р. Изготовлены пять образцов физической модели ТТ класса Р. Выполнена верификация изготовленных физических моделей ТТ класса Р. Проведены испытания по определению максимальных значений остаточных магнитных индукций для образцов физических моделей ТТ. Установлены закономерности влияния нагрузочных токов на затухание во времени остаточной индукции в сердечниках ТТ.

Ключевые слова: трансформатор тока, класс Р, характеристика намагничивания, магнитная индукция, потокосцепление, остаточная магнитная индукция, магнитная индукция насыщения, измерение, метод измерения.

**Abstract:** the analysis of existing approaches to determining the remanent magnetic induction coefficient in toroidal cores of current transformers for relay protection is carried out. A technique has been developed and the parameters of the physical model of a class P current transformer have been calculated. Five samples of the physical model of class P current transformers were made. Verification of the manufactured physical models of class P current transformers has been performed. Tests were carried out to determine the maximum values

### Введение

Режим работы ТТ при коротких замыканиях (КЗ) в первичной сети определяется фактической кратностью первичного тока, постоянной времени затухания аperiодической составляющей первичного тока, характеристикой намагничивания сердечника с учетом остаточной магнитной индукции, а также другими параметрами ТТ.

При координации функционирования ТТ и устройств релейной защиты и автоматики (РЗА) электроэнергетических систем в переходных режимах КЗ важное значение имеет такой параметр, как предельная остаточная магнитная индукция в магнитопроводе ТТ.

Для защитных ТТ класса Р требование ограничения остаточной магнитной индукции в стандартах [1 – 3] отсутствует. В соответствии с [3] расчетное значение остаточной магнитной индукции в сердечниках ТТ без немагнитного зазора (ТТ класса Р) рекомендуется принимать равным 0,86 от маг-

нитной индукции насыщения. Указанная рекомендация существенным образом усложняет условия проверки функционирования быстродействующих устройств РЗ, так как расчетные значения времени до насыщения могут сократиться до нескольких миллисекунд. Во многих случаях такого времени недостаточно для принятия быстродействующими функциями устройств микропроцессорных защит решения о местонахождении КЗ в зоне или вне зоны действия и выдачи соответствующего сигнала на срабатывание или блокирование действия.

Исследования, проведенные в СССР и в зарубежье, не подтверждают вышеуказанную рекомендацию. В частности, в стандарте МЭК 60255-121:2014 [4] в ответственных случаях рекомендуется использовать расчетное значение остаточной магнитной индукции, равное 0,75 от магнитной индукции насыщения 2 Тл.

Отмеченное выше объясняет необходимость проведения исследования оста-

точных магнитных индукций в современных встроенных и опорных ТТ высокого и сверхвысокого напряжения. Наиболее удобно выполнить такое исследование с помощью уменьшенных физических моделей в различных режимах функционирования.

### Цели исследования:

- уточнение максимального значения остаточной магнитной индукции в сердечниках ТТ;
- оценка влияния нагрузочных токов на затухание во времени остаточной индукции в сердечниках ТТ.

### Анализ существующих подходов к определению коэффициента остаточной намагниченности в тороидальных сердечниках ТТ для РЗ

Под коэффициентом остаточной намагниченности ( $K_r$ ) понимается отношение остаточного потокосцепления ( $\Psi_r$ ) к потокосцеплению насыщения ( $\Psi_s$ ), выраженное в относительных единицах или процентах:

$$K_r = \frac{B_r}{B_s} = \frac{\Psi_r}{\Psi_s}, \quad (1)$$

$B_r(\Psi_r)$  – значение остаточной магнитной индукции (потокосцепления);

$B_s(\Psi_s)$  – индукция (потокосцепление) насыщения магнитопровода.

Предельное значение остаточной магнитной индукции  $B_r$  зависит от свойств материала магнитопровода и его конструкции. Указанная величина достаточно строго определяется опытным путем. Отличие в определениях понятия  $B_r$  в современных стандартах заключается лишь в том, что в [1] указывается конкретное время (3 мин.), по истечении которого после отключения намагничивающего тока может быть зафиксировано значение остаточной магнитной индукции, а в [3] время не определено.

Определение термина индукция насыщения  $B_s$  в разных источниках отличается. По этой причине отличаются и значения  $B_s$  для одного и того же магнитопровода ТТ, что существенно влияет на конечное значение коэффициента остаточной намагниченности  $K_r$ . Например, пусть для ТТ класса Р  $B_r = 1,55$  Тл, тогда

$$\text{– если } B_s = 2 \text{ Тл, то } K_r = \frac{1,55}{2} = 0,77;$$

$$\text{– если } B_s = 1,8 \text{ Тл, то } K_r = \frac{1,55}{1,8} = 0,86.$$

Ниже рассмотрены различные подходы к определению индукции насыщения  $B_s$  ТТ.

Наиболее полно понятие индукции насыщения магнитопровода ТТ в отечественной технической литературе изложено в [5].

Слагающие индукции показаны на рис. 1. При значительном увеличении напряженности поля намагниченность стремится к своему значению в условиях насыщения  $J_s$ . В [5] индукция, соответствующая указанному значению намагниченности, называется индукцией насыщения и определяется следующим выражением:

$$B_s = \mu_0 J_s,$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м)

Тогда результирующая индукция продолжает возрастать и определяется с помощью следующего выражения:

$$B = \mu_0 H + B_s.$$

Характер возрастания индукции после достижения значения  $B_s$  такой же, как у пустоты. Этому наименьшему наклону кривой намагничивания соответствует дифференциальная индуктивность насыщения:

$$L_s = \frac{d\Psi}{di} \text{ при } H \rightarrow \infty.$$

Для тороида:

$$L_s = \frac{\mu_0 w^2 s}{l},$$

где  $l$ ,  $s$ ,  $w$  – соответственно, средняя длина силовой линии, сечение стали магнитопровода и число витком обмотки тороида.

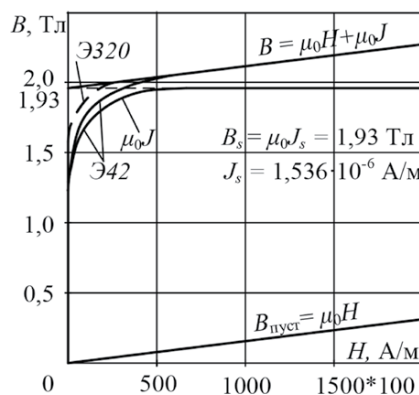


Рис. 1. Основные кривые индукции и намагниченности сталей Э42 и Э320 [5]

of remanent magnetic inductions for samples of physical models of current transformers. The regularities of the influence of load currents on the attenuation of remanent induction in the cores of current transformers are established.

**Keywords:** current transformer, class P, magnetization characteristic, magnetic induction, flux linkage, remanent magnetic induction, saturation magnetic induction, measurement, measurement method.



Дегтярев

Андрей Александрович

Дата рождения: 07.03.1985.

В 2007 г. окончил

Южно-Российский государственный технический университет (НПИ), кафедра «Автоматика и телемеханика».

В 2011 г. в ЮРГТУ

(НПИ, г. Новочеркасск)

защитил кандидатскую диссертацию.

Ведущий инженер

ООО НПФ «Квазар».



Кужеков

Станислав Лукьянович

Дата рождения: 23.10.1941.

В 1964 г. окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ). В 1988 г. в Институте электродинамики АН УССР (г. Киев) защитил докторскую диссертацию.

Главный инженер

ООО НПФ «Квазар».

При насыщении дифференциальная индуктивность катушки никогда не падает ниже этого предельного значения, которое равно индуктивности катушки в воздухе.

У ТТ с замкнутым магнитопроводом удельный намагничивающий ток численно равен напряженности основного магнитного поля:

$$I_{0уд} = \frac{I_0 w_2}{l} = H, \quad (2)$$

где  $I_0$  – действующее значение намагничивающего тока.

При этом в [6] отмечается, что удельная ЭДС насыщения для частоты  $f = 50$  Гц равна:

$$E_{уд.с} = 4,44 f B_s. \quad (3)$$

С помощью выражений (2), (3) по эффективной характеристике холостого хода ТТ в действующих значениях можно рассчитать характеристики намагничивания вида  $B_m(H)$ .

На рис. 2 показана удельная характеристика холостого хода, построенная в [6] для ТТ с замкнутым ленточным магнитопроводом из стали 3413 (Э330) толщиной 0,35 мм при частоте 50 Гц.

В [6] указано, что по характеристике, приведенной на рис. 2, найдена ЭДС насыщения  $E_{уд.с} = 295$  В/м<sup>2</sup> и  $H_s = 112$  А/м. При этом индукция насыщения, рассчитанная по выражению (3), равна  $B_s = 1,35$  Тл, что значительно ниже указанной в [5]  $B_s = 1,93$  Тл.

Вопрос наличия остаточной индукции в защитных ТТ класса Р подробно рассмотрен в [7]. Там же указано, что для измерения предельного значения остаточной магнитной индукции методом постоянного тока во вторичную обмотку ТТ необходимо подавать такое значение тока, при котором напряженность магнитного поля в сердечнике достигает значений  $H = 2500 \div 10000$  А/м. При такой напряженности восходящая и нисходящая ветви предельной петли гистерезиса сливаются и намагниченность становится однозначной. Согласно [8] крайним значениям указанного диапазона напряженностей для холоднокатаной стали Э310 (3411) с толщиной листа 0,35 мм соответствуют минимальные значения магнитной индукции:  $B_{2500} = 1,75$  Тл и  $B_{10000} = 1,91$  Тл.

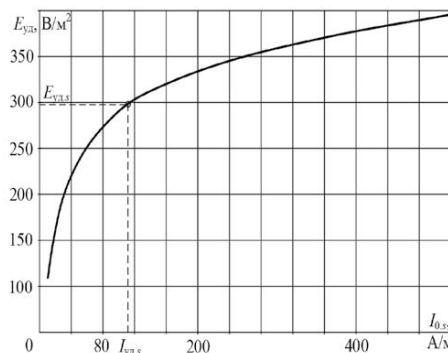


Рис. 2. Удельная характеристика холостого хода стали 3413 (Э330)

Стандарт [3] определяет потокосцепление насыщения  $\Psi_{sat}$  как максимальное значение магнитного потока, соответствующее насыщению материала магнитопровода, умноженное на число витков обмотки.

Кроме того, в разделе А.1.1 стандарта [3], поясняющем определение коэффициента остаточной намагниченности  $K_r$  методом разряда конденсатора на вторичную обмотку ТТ, указано, что для получения правильного значения  $K_r$  необходимо обеспечить достижение полностью насыщенного состояния трансформатора перед тем, как ток начнет уменьшаться до нуля. Критерием достаточности насыщения служит форма первой полуволны тока, от начала приложения напряжения до первого перехода тока через нуль (рис. 3).

На осциллограмме тока (рис. 3) можно выделить характерный пик, свидетельствующий о наступлении насыщения. Степень насыщения считается достаточной, если коэффициент амплитуды этой полуволны (отношение амплитудного значения к среднеквадратичному) не менее 2,5. Данный критерий (по сравнению с предыдущими) отличается практической направленностью, хотя в нем и не указывается конкретное значение индукции насыщения.

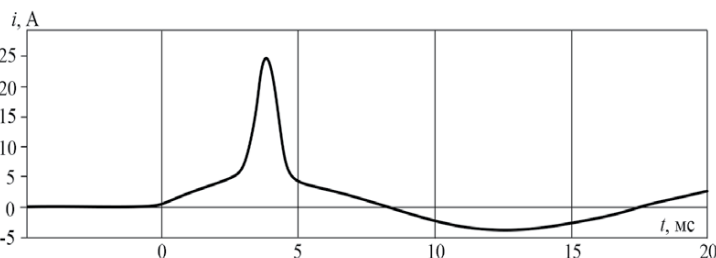


Рис. 3. Характерная осциллограмма вторичного тока по методу разряда конденсатора

В утратившем силу стандарте МЭК 60044-1 [2] индукция насыщения определяется следующим образом: это максимальное значение индукции, соответствующее точке характеристики  $B(H)$ , в которой увеличение  $B$  на 10 % приводит к увеличению  $H$  на 50 %.

В указанном стандарте подход к определению магнитной индукции насыщения четко регламентируется, но подобно предварительному национальному стандарту [3], не дается конкретных значений индукции или выражений для ее определения. Данный подход ориентирован на экспериментальное определение значения  $B_s$  для конкретного образца ТТ.

Однако, как отмечается в [9], это определение не получило признания, поскольку значения потока насыщения получались слишком низкими, что привело к противоречиям и неопределенности. На практике, при использовании указанного (устаревшего) подхода к определению индукции насыщения коэффициент остаточной намагниченности для ТТ класса Р зачастую получается больше единицы, что противоречит физическому смыслу  $K_r$ .

Например, значение коэффициента остаточного потокосцепления для случая, показанного на рис. 4, в соответствии с МЭК 60044-1 приблизительно равно 106 %.

Таким образом, подход к определению потока насыщения ( $\Psi_s$ ), приведенный в стандарте МЭК 60044-1 [2], пригоден только для ТТ с ограничением остаточного потока до значения 10 % (ТТ классов PR, TPY и TPZ).

В стандарте МЭК 61869-2 [1] определение потока насыщения было изменено: «Максимальное значение вторичного связанного потока в трансформаторе тока, которое соответствует магнитному насыще-

нию материала сердечника», со следующим примечанием: «Наиболее подходящим способом определения потока насыщения является метод постоянного тока, описанный в пункте 2В.2.3».

Определение из МЭК 61869-2 не так математически строго, как предыдущее, но с другой стороны, оно более пригодно для практического применения.

Для ТТ с замкнутым сердечником авторами технического отчета МЭК [9] было предложено следующее упрощенное определение потока насыщения: «Максимальное значение потока, которое существует в сердечнике, как можно ближе к состоянию полного насыщения». При этом уточняется, что указанному значению потока соответствует точка характеристики намагничивания  $\Psi(i)$  сердечника ТТ, в которой уменьшение потока на 5 % приводит к уменьшению тока в 5 раз (критерий «пять процентов – пять раз»). В [9] приведены результаты проверки пригодности этого метода, из которых следует, что значения  $\Psi_s$  остаются примерно на 0-3 % ниже потока насыщения, полученного в соответствии с МЭК 61869-2.

Абсолютное значение предельной остаточной индукции для отечественных ТТ с замкнутыми магнитопроводами из холоднокатанной стали производства 30–60-ых годов XX века по данным [10, 11] составляет около 1 Тл. По другим данным [7], для ТТ середины XX века с замкнутыми магнитопроводами из стали марки Э310 значения предельной остаточной индукции находятся в диапазоне 0,8 – 1,47 Тл.

Современные отечественные ТТ класса Р изготавливаются из холоднокатанной стали марки 3408 в соответствии с ГОСТ 21427.1-83 [12]. По данным, представленным в [13], для указанных ТТ предельная остаточная индукция достигает 1,51 – 1,55 Тл.

Данные по абсолютным значениям предельной остаточной индукции для ТТ зарубежных производителей отсутствуют.

В [7] приведены результаты исследованной остаточной индукции, выполненных в начале 70-ых годов XX века на Новочеркасской ГРЭС, для ТТ следующих видов:

- с тороидальными сердечниками из холоднокатанной стали марки Э310;
- с сердечниками из горячекатанной стали Э42;
- шинные ТТ с сердечниками из стали Э310.

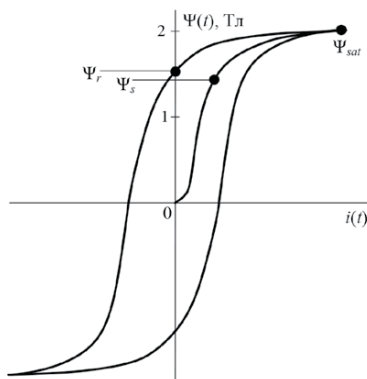


Рис. 4. Сравнение определений насыщения согласно МЭК 60044-1 и МЭК 61869-2 [9]



Дони

Николай Анатольевич

Дата рождения: 26.10.1946.  
В 1969 г. окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института (НПИ).  
В 1981 г. во ВНИИЭ защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка высокочастотной защиты линий сверхвысокого напряжения». Имеет более 150 научных публикаций в области релейной защиты, микропроцессорной техники и цифровой обработки электроэнергетических сигналов.  
Директор по науке – заведующий отделом СРЗиА ООО НПП «ЭКРА».



Шурупов

Алексей Александрович

Дата рождения: 25.03.1951.  
В 1973 г. окончил Новочеркасский политехнический институт (НПИ), кандидат технических наук (НПИ, 1981 год), старший научный сотрудник.  
Заведующий отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА».



При этом регистрировались значения фактической остаточной индукции в относительных единицах:

$$B_{r.факт*} = \frac{B_{r.факт}}{B_{r.пред}} \cdot 100,$$

где  $B_{r.факт}$  – фактическое начальное значение остаточной индукции в магнитопроводе ТТ;

$B_{r.пред}$  – предельное значение остаточной индукции для данного ТТ.

Оказалось, что в среднем у ТТ первой группы  $B_{r.факт*}$  составляло 16,2%, у ТТ второй группы – 30%, а у ТТ третьей группы – 36,4%. Значения близкие к  $B_{r.пред}$  не были зарегистрированы ни разу.

Кроме того, в [7] рассмотрено размагничивающее влияние периодического симметричного тока. В общем случае частный цикл перемагничивания сердечника может быть не симметричным и в переходном режиме перемещаться в осях  $B, H$ . При этом мгновенное значение индукции в [7] представлено в виде апериодической ( $B_a$ ) и периодической ( $B_{п.}$ ) составляющих:

$$B = B_a + B_{п.}$$

Составляющая  $B_a$  изменяется сравнительно медленно в соответствии с параметрами вторичного контура ТТ. В установившемся режиме ее значение постоянно и равно среднему за период значению индукции. Случай при  $B_a \neq 0$  является основным режимом для ТТ в процессе эксплуатации, так как намагниченность одного знака сохраняется в их сердечниках. Периодический ток вызывает в сердечнике периодическую составляющую индукции, которую можно считать практически синусоидальной. При этом, как указано в [7], апериодическая слагающая начинает уменьшаться и через некоторый промежуток времени, продолжительность которого зависит от нагрузки, достигает своего установившегося значения  $B_{a.уст.}$  характерного для данной амплитуды периодической составляющей  $B_{пм.}$  Индукция  $B_{a.уст.}$  в дальнейшем сохраняется неопределенно долго и может уменьшиться лишь при увеличении  $B_{пм.}$

Подобное исследование остаточной намагниченности сердечников ТТ в условиях эксплуатации было выполнено в 2014 г. на ОРУ 500 кВ Ростовской АЭС для зарубежных ТТ типа SAS550 (производитель «TRENCH», Германия). Результаты данного исследования получились противоречивыми [13]: если по общей первичной обмотке нескольких ТТ проходил один и тот же ток, то остаточная индукция в сердечниках этих ТТ должна быть хотя бы одного знака. Однако, судя по результатам, приведенным в [13], в сердечниках таких ТТ остаточные индукции имели разные знаки. Поэтому нельзя утверждать, что данные значения являются результатом прохождения тока КЗ. Более вероятно, что они получены после выполнения работ в цепях вторичного тока.

Большая работа по изучению остаточной намагниченности в лабораторных условиях была проделана отделом исследований ООО «Эльмаш (УЭТМ)». По результатам данной работы в [13] сделан вывод, что начальная остаточная намагниченность сердечника ТТ незначительно уменьшается после протекания первичного тока и слабо зависит от вторичной нагрузки.

В техническом отчете МЭК [9] отмечено, что на практике максимальный коэффициент остаточной намагниченности сердечников без зазора обычно находится в диапазоне от 60% до 95% и зависит от применяемого материала магнитного сердечника и составляющих его сплава. Хотя во многих зарубежных источниках [4, 14, 15] для ТТ с сердечником без зазора диапазон коэффициента остаточного намагничивания  $K_r$  принимается равным от 75% до 80%. Однако на сегодняшний день по данным, приведенным в [9], найдено несколько материалов магнитопроводов защитных ТТ с коэффициентом остаточной намагниченности до 95%. В указанном докладе МЭК проводится приближенное временное разграничение для ТТ с замкнутыми магнитопроводами (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициент остаточной намагниченности

	Старые ТТ (1930 – 1990 гг.)	Новые ТТ (после 1995 г.)
Максимальное значение <sup>1</sup>	75 – 77 %	88 – 95 %
Фактическое значение <sup>2</sup>	70 – 75 %	85 – 87 %

1. Максимально возможная остаточная намагниченность в соответствии с предельной петлей гистерезиса.  
2. Фактическая остаточная намагниченность, замеренная после обесточивания, ввода в эксплуатацию или других испытаний.

Таким образом, следует отметить значительное различие в значениях индукции насыщения электротехнической стали в литературных источниках и определенное противоречие в приведенных в [7], [9] и [13] сведениях о влиянии на размагничивание сердечника ТТ периодического симметричного тока.

### Верификация физических моделей ТТ класса Р

На основе подхода к расчету параметров физической модели ТТ [16, 17] выполнен расчет уменьшенной физической модели ТТ класса 10Р. В качестве реального образца принят отечественный ТТ класса 10Р типа ТФЗМ-220-Б 1200/1. Основные параметры рассчитанной физической модели ТТ класса Р и реального ТТ приведены в табл. 2. Всего для испытаний было изготовлено пять образцов физической модели ТТ класса 10Р.

Под верификацией в данном разделе понимается сопоставление расчетных значений параметров физической модели ТТ с измеренными значениями данных параметров каждого образца физической модели ТТ. Верификации подлежат следующие параметры физической модели ТТ:

- коэффициент трансформации –  $n$ ;
- сопротивление вторичной обмотки –  $R_2$ ;

- напряжение точки перегиба вольт-амперной характеристики (ВАХ) –  $U_k$ ;
- номинальная предельная кратность –  $K_{\text{НОМ}}$ .

Таблица 2. Параметры ТТ ФЭМ-220-Б 1200/1

Наименование параметра	Обозначение	Значение	
		ФЭМ-220-Б	Физ. модель
Номинальный первичный ток, А	$I_{1,\text{НОМ}}$	1200	2,279
Номинальный вторичный ток, А	$I_{2,\text{НОМ}}$	1	0,715
Номинальная предельная кратность, отн. ед.	$K_{\text{НОМ}}$	20,3	
Номинальное сопротивление нагрузки, Ом	$z_{\text{н.НОМ}}$	50	1,784
Номинальный коэффициент мощности нагрузки, отн. ед.	$\cos\varphi$	0,8	
Активное сопротивление первичной обмотки, Ом	$R_1$	-	0,351
Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом	$R_2$	7,6	0,99
Индуктивное сопротивление вторичной обмотки, Ом	$X_2$	0	
Число витков первичной обмотки	$w_1$	1	80
Число витков вторичной обмотки	$w_2$	1200	255
Поперечное сечение магнитопровода, м <sup>2</sup>	$s$	$31 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$

Расчетное значение коэффициента трансформации физической модели ТТ равно

$$n_{\text{расч}} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{255}{80} = 3,1875.$$

Расчетное значение сопротивления вторичной обмотки физической модели ТТ ( $R_{2,\text{расч}}$ ) в соответствии с данными табл. 2 принимается равным:

$$R_{2,\text{расч}} = 0,99 \text{ Ом.}$$

Расчетное значение напряжения в точке перегиба ВАХ ( $U_{k,\text{расч}}$ ) определяется с помощью типовой характеристики намагничивания холоднокатаной стали марки 3408 с толщиной 0,35 мм (из данной стали изготовлены сердечники образцов физической модели ТТ), которая приведена в каталоге выпускаемой продукции Новолипецкого металлургического комбината [18]. Данная характеристика с указанием координат точки перегиба ( $B_k(H_k)$ ) приведена на рис. 5. Расчетное значение  $U_{k,\text{расч}}$  определяется с помощью следующего выражения:

$$U_{k,\text{расч}} = 222 \cdot B_k \cdot w_2 \cdot s = 222 \cdot 1,6 \cdot 255 \cdot 0,00049 = 44,382 \text{ В,}$$

где  $B_k$  – значение амплитуды магнитной индукции в точке перегиба характеристики намагничивания стали магнитопровода ТТ;

$w_2$  – число витков вторичной обмотки ТТ;

$s$  – площадь сечения магнитопровода ТТ.

Расчетное значение номинальной предельной кратности определяется в соответствии с методикой, изложенной в [19].

Вначале по выражению (2.5) из [19] определяется номинальное удельное сопротивление ветви вторичного тока

$$z_{2,\text{НОМ.уд}} = z_{s,\text{НОМ}} \frac{l}{s \cdot w_2^2},$$

где  $z_{s,\text{НОМ}}$  – номинальное суммарное сопротивление ветви вторичного тока

$$z_{s,\text{НОМ}} = z_{\text{н.НОМ}} + z_2;$$

$z_{\text{н.НОМ}}$  – номинальное сопротивление нагрузки, подключенной ко вторичным выводам ТТ;

$z_2$  – сопротивление вторичной обмотки ТТ.

Так как для физической модели ТТ  $X_2$  принимается равным нулю, тогда номинальное удельное сопротивление ветви вторичного тока равно:

$$z_{2,\text{НОМ.уд}} = \sqrt{(R_2 + 0,8z_{\text{н.НОМ}})^2 + (0,6z_{\text{н.НОМ}})^2} \frac{l}{s \cdot w_2^2} =$$

$$= \sqrt{(0,99 + 0,8 \cdot 1,784)^2 + (0,6 \cdot 1,784)^2} \frac{0,232}{0,00049 \cdot 255^2} = 19,29 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м.}$$

Кроме того, номинальное удельное сопротивление ветви вторичного тока может быть определено в соответствии с выражением (2.7) из [19]

$$z_{2,\text{НОМ.уд}} = 22,2 \frac{B}{H}. \quad (5)$$

С помощью характеристики намагничивания, приведенной на рис. 5, и соотношения (5) определяются значения индукции ( $B_{\text{пр}}$ ) и напряженности ( $H_{\text{пр}}$ ) магнитного поля, соответствующие значению номинальной предельной кратности при  $z_{2,\text{НОМ.уд}} = 19,29 \cdot 10^{-3} \text{ Ом/м}$ . Указанные значения равны  $B_{\text{пр}} = 1,94 \text{ Тл}$  и  $H_{\text{пр}} = 2250 \text{ А/м}$ .

Удельная предельная кратность определяется в соответствии с выражением (2.8) из [19]

$$K_{10,\text{уд}} = \frac{222 \cdot B_{\text{пр}}}{I_{2,\text{НОМ}} \cdot z_{2,\text{НОМ.уд}}} = \frac{222 \cdot 1,94}{0,715 \cdot 19,29 \cdot 10^{-3}} = 31228.$$

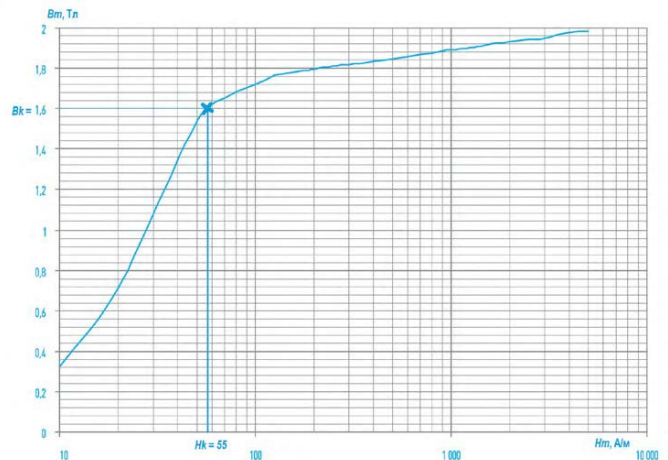


Рис. 5. Типовая характеристика намагничивания холоднокатаной стали марки 3408 с толщиной 0,35 мм производства Новолипецкого металлургического комбината

Расчетное значение номинальной предельной кратности физической модели ТТ вычисляется с помощью выражения (2.6) из [19]

$$K_{\text{ном.расч}} = K_{10.\text{уд}} \frac{l}{w_2} = 31228 \cdot \frac{0,232}{255} = 28,47.$$

Измерение фактических значений параметров каждого образца физической модели ТТ выполнялось с помощью специализированного устройства для измерения параметров и поверки ТТ CT Analyzer (производитель «Omicron», Австрия).

Разницу между расчетными и измеренными значениями параметров физической модели ТТ удобно оценить с помощью следующего выражения:

$$\delta = \frac{A_{\text{расч}} - A_{\text{изм}}}{A_{\text{расч}}} \cdot 100\%,$$

где  $A_{\text{расч}}$  – расчетное значение параметра физической модели ТТ;

$A_{\text{изм}}$  – измеренное значение параметра образца физической модели ТТ.

Результаты верификации образцов физической модели ТТ приведены в табл. 3 и 4.

Из табл. 3 и 4 видно, что отличия расчетных и измеренных значений параметров физической модели ТТ не превышают 10 %. Таким образом, верификация может быть признана успешной.

Таблица 3. Результаты верификации образцов №1 и 2 физической модели ТТ

Параметр	Расчетное значение	Образец №1		Образец №2	
		Измеренное значение	$\delta, \%$	Измеренное значение	$\delta, \%$
$R_2, \text{Ом}$	0,99	0,957	3,33	0,95	4,04
$n$	3,1875	3,188	-0,02	3,187	0,02
$K_{\text{ном}}$	28,47	25,83	9,27	25,83	9,27
$U_{kr}, \text{В}$	44,382	40,487	8,78	41,318	6,90

### Результаты определения остаточных магнитных индукций в сердечниках ТТ

Максимально полное исследование (по числу опытов и их разноплановости) было проведено для образца №1 физической модели ТТ типа ТФЗМ-220-Б 1200/1. Для указанного образца большинство опытов было выполнено минимум три раза. В общей сложности было выполнено более 800 опытов.

Таблица 4. Результаты верификации образцов №3, 4 и 5 физической модели ТТ

Параметр	Расчетное значение	Образец №3		Образец №4		Образец №5	
		Измеренное значение	$\delta, \%$	Измеренное значение	$\delta, \%$	Измеренное значение	$\delta, \%$
$R_2, \text{Ом}$	0,99	0,958	3,23	0,951	3,94	0,956	3,43
$n$	3,1875	3,187	0,02	3,187	0,02	3,187	0,02
$K_{\text{ном}}$	28,47	26,215	7,92	25,83	9,27	26,4	7,27
$U_{kr}, \text{В}$	44,382	41,919	5,55	41,508	6,48	41,532	6,42

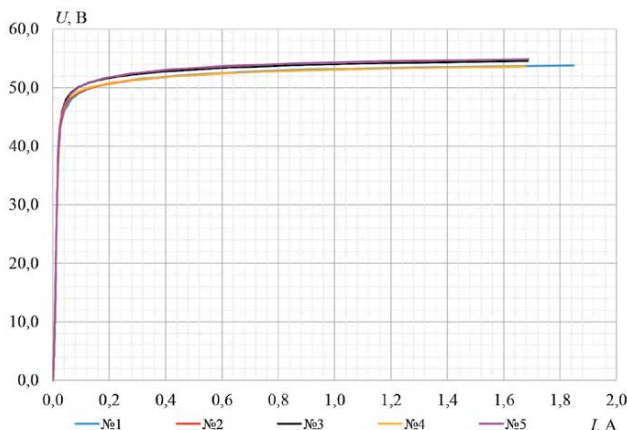


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) всех образцов

Абсолютное большинство опытов было проведено с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-51 и специализированного устройства для измерения параметров и поверки ТТ CT Analyzer.

Результаты снятия ВАХ для всех пяти образцов физической модели ТТ приведены на рис. 6.

**Измерение значения коэффициента остаточной намагниченности** всех образцов физической модели ТТ выполнялось автоматизированным способом с помощью устройства CT Analyzer для измерительной схемы, представленной на рис. 7. При этом в настройках устройства CT Analyzer указывалось измерение в соответствии со стандартом МЭК 61869-2 [1].

В устройстве CT Analyzer используется метод переменного тока.

При определении коэффициента остаточной намагниченности методом переменного тока необходимо интегрировать напряжение, приложенное ко вторичной обмотке ТТ, в соответствии со следующим уравнением:

$$\Psi(t) = \int_0^t (u(t) - R_2 \cdot i_0(t)) dt,$$

где  $u(t)$  и  $i_0(t)$  – мгновенные значения напряжения и намагничивающего тока.

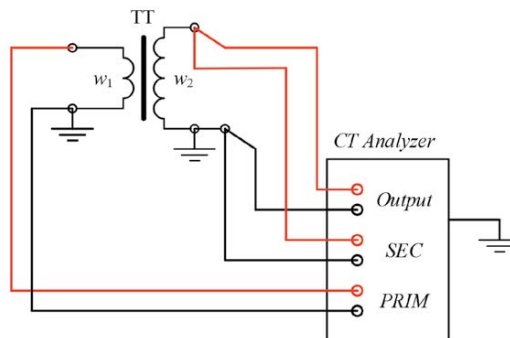


Рис. 7. Схема для снятия ВАХ и других характеристик физической модели ТТ

Совмещение полученного потокосцепления и мгновенных значений намагничивающего тока на одном графике позволит отобразить предельную петлю гистерезиса (рис. 4).

Потокосцепление вторичной обмотки при нулевом значении намагничивающего тока, как принято считать, представляет собой предельное значение остаточного потокосцепления (рис. 4). Коэффициент остаточной намагниченности определяется в соответствии с выражением (1).

В устройстве СТ Analyzer потокосцепление насыщения измеряется двумя способами:

- в соответствии с МЭК 61869-2 – это значение, при котором кривая намагничивания является практически горизонтальной линией ( $\Psi_s$ );
- с помощью критерия, предложенного в IEC TR 61869-100 – уменьшение потока на 5 % приводит к уменьшению тока в 5 раз ( $\Psi_{s,5.5}$ ).

При этом в устройстве СТ Analyzer значение  $K_r$  рассчитывается с помощью значения  $\Psi_s$  (в соответствии с МЭК 61869-2).

Результаты измерения значения коэффициента остаточной намагниченности для всех пяти образцов физической модели ТТ приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты измерения коэффициента остаточной намагниченности

Образец	$K_r$	$K_{r,ср}$	$\Psi_{sr}$ Вб	$B_{sr}$ Тл	$B_{pr}$ Тл	$\Psi_{s,5.5r}$ Вб	$B_{s,5.5r}$ Тл
1	0,946	0,95	0,2290	1,833	1,733	0,2263	1,811
2	0,948		0,2283	1,827	1,731	0,2260	1,809
3	0,964		0,2214	1,772	1,707	0,2292	1,834
4	0,954		0,2284	1,828	1,743	0,2244	1,796
5	0,948		0,2334	1,868	1,770	0,2319	1,856

Из результатов измерения, представленных в табл. 5, видно, что в среднем значение коэффициента остаточной намагниченности для физической модели ТТ, полученное методом переменного тока, составляет 95 %.

Для образца №1 был проведен опыт, по результатам которого построена предельная петля гистерезиса (рис. 8). Испытательная схема для указанного опыта представлена на рис. 9.

Коэффициент остаточной намагниченности по данным, представленным на рис. 8, равен:

$$K_r = \frac{B_r}{B_s} = \frac{1,82}{1,93} = 0,943.$$

По результатам, представленным в данном разделе, можно сделать следующие выводы:

- в среднем значение коэффициента остаточной намагниченности для физической модели ТТ, полученное методом переменного тока, составляет 95 %;
- значения коэффициента остаточной намагниченности, полученные для образца №1 путем автоматизированного замера устройством СТ Analyzer и путем обработки цифровых осциллограмм тока и напряже-

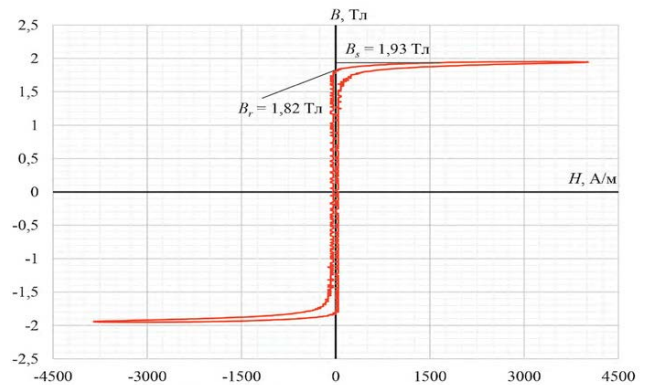


Рис. 8. Предельная петля гистерезиса для образца №1

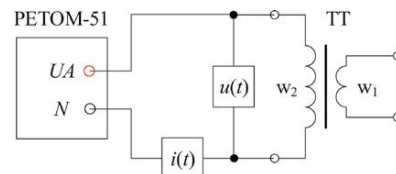


Рис. 9. Испытательная схема для получения предельной петли гистерезиса образца №1:

ТТ – испытуемый трансформатор тока;

$u(t)$ ,  $i(t)$  – устройства регистрации тока и напряжения (Tektronix TDS 2014B)

ния (получены с помощью цифрового осциллографа Tektronix TDS 2014B), практически совпадают: 94,6 и 94,3 %, соответственно.

**Измерение остаточной намагниченности после отключения первичного тока насыщенного ТТ** всех образцов физической модели выполнялось автоматизированным способом с помощью устройства СТ Analyzer для измерительной схемы, представленной на рис. 10. При этом в настройках устройства СТ Analyzer указывалось измерение в соответствии со стандартом МЭК 61869 - 2 [1].

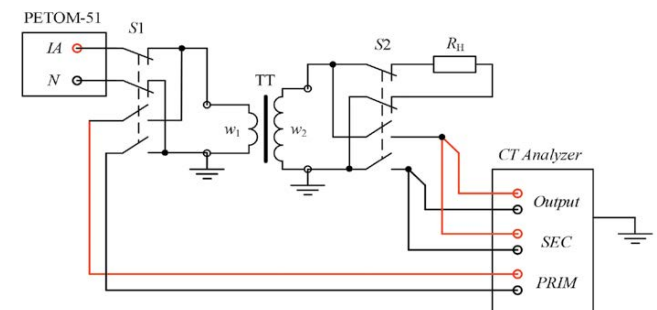


Рис. 10. Схема определения остаточной намагниченности:

ТТ – испытуемый трансформатор тока;

S1, S2 – ключи для переключения схемы из нагрузочного режима в измерительный (исходное состояния ключей соответствует нагрузочному режиму);

$R_n$  – нагрузочный резистор



Непосредственно перед опытом сердечник физической модели ТТ намагничивался до уровня, соответствующего насыщению. Для этого в первичную обмотку ТТ с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-51 подавались два варианта сигнала тока:

- постоянный ток длительностью 0,3 с и значением 15 А. Указанной длительности и значения импульса постоянного тока достаточно для приведения сердечника физической модели ТТ в насыщенное состояние;

- почти два периода (37,4 мс) переменного тока с максимальным содержанием апериодической составляющей. Действующее значение периодической составляющей равнялось 10 А, начальная фаза 0, а постоянная времени затухания апериодической составляющей – 0,1 с. Момент отключения первичного тока соответствовал его переходу через 0 (из положительной полуплоскости в отрицательную).

Испытания проводились при разных значениях сопротивления резистора ( $R_{н}$ ), выполняющего роль нагрузки во вторичной цепи физической модели ТТ: 10, 60 и 120 % от номинального сопротивления нагрузки ( $R_{ном}$ ) для образца №1 и 10, 120 % для остальных.

После намагничивания сердечника физической модели ТТ до уровня, соответствующего насыщению, первичный ток отключался программным способом, с

Таблица 6. Результаты измерения остаточной намагниченности после отключения первичного тока насыщенного ТТ для образца №1

$R_{н}$ , %	Намагничивание	$t_{паузы}$	$\Psi_{г,ср}$ Вб	$K_{г,ср}$ , %	$B_{г,ср}$ Тл
20	Постоянный ток	10 с	0,1937	85,3	1,551
		3 мин	0,1936	87,3	1,549
	Переменный ток с апериодической составляющей	10 с	0,1938	85,3	1,551
		3 мин	0,1937	85,3	1,551
60	Постоянный ток	10 с	0,1941	85,3	1,554
		3 мин	0,1938	85,7	1,551
	Переменный ток с апериодической составляющей	10 с	0,1943	85,3	1,555
		3 мин	0,1941	85	1,553
120	Постоянный ток	10 с	0,1936	85,7	1,55
		3 мин	0,1935	85	1,549
	Переменный ток с апериодической составляющей	10 с	0,1938	87	1,551
		3 мин	0,1936	85	1,55

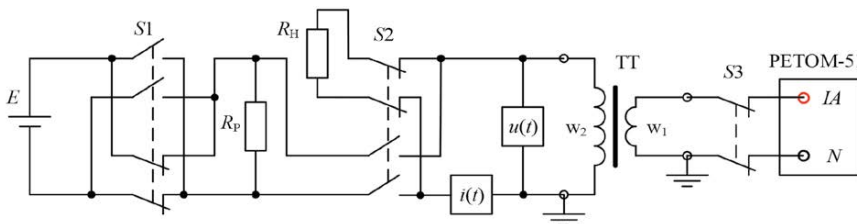


Рис. 11. Схема определения остаточной намагниченности методом постоянного тока с переключением полярности:

- ТТ – испытуемый трансформатор тока;
- $u(t)$ ,  $i(t)$  – устройства регистрации тока и напряжения;
- S1 – ключ для переключения полярности постоянного тока;
- S2 – ключ для переключения схемы из нагрузочного режима в измерительный (исходное состояние ключей соответствует нагрузочному режиму);
- S3 – ключ для подачи постоянного тока во вторичную обмотку ТТ;
- $R_p$  – разрядный резистор;
- $R_n$  – нагрузочный резистор;
- E – изолированный источник постоянного напряжения или аккумуляторная батарея

помощью ПО РЕТОМ-51. При этом ключи S1 и S2 оставались в исходном состоянии в течение требуемого интервала времени: пока потокосцепление в сердечнике ТТ снизится от значения  $\Psi_s$  до значения остаточного потокосцепления  $\Psi_r$ . Т.е. вторичная цепь не размыкалась, что полностью соответствует реальным условиям эксплуатации ТТ. Длительность паузы соответствовала двум значениям – 10 с и 3 мин.

В качестве примера для образца №1 в табл. 6 приведены результаты измерения остаточной намагниченности после отключения первичного тока насыщенного ТТ.

Кроме того, для образца №1 был проведен отдельный опыт определения остаточной намагниченности после отключения первичного тока насыщенного ТТ методом перемагничивания постоянным током. Испытательная схема для указанного опыта представлена на рис. 11. По результатам данного опыта построена зависимость потокосцепления от тока (рис. 12). Опыт был повторен шесть раз, при этом длительность паузы соответствовала двум значениям – 10 с и 3 мин. Результаты указанных опытов полностью совпадают.

Коэффициент остаточной намагниченности в опыте перемагничивания постоянным током определяется с помощью следующего выражения:

$$K_r = \frac{|\Psi(t_2)| - |\Psi(t_1)|}{|\Psi(t_1)| + |\Psi(t_2)|} \cdot 100\% = \frac{|\Psi_{max}| - |\Psi_{min}|}{|\Psi_{min}| + |\Psi_{max}|} \cdot 100\% = \frac{|0,442| - |-0,041|}{|-0,041| + |0,442|} \cdot 100\% = 83\%$$

где  $t_1$  – момент времени, предшествующий переключению полярности источника постоянного тока E ключом S1 (рис. 11);

$t_2$  – момент времени, предшествующий обратному переключению схемы в нагрузочный режим, путем переключения ключа S2 (рис. 11).

По данным, представленным на рис. 12, были определены значения потокосцепления насыщения и остаточного потокосцепления:

$$\Psi_s = \frac{|\Psi_{\min}| + |\Psi_{\max}|}{2} = \frac{|-0,041| + |0,442|}{2} = 0,2415 \text{ Вб};$$

$$\Psi_r = \Psi_s - |\Psi_{\min}| = 0,2415 - |-0,041| = 0,2 \text{ Вб}.$$

По полученным значениям потокосцепления для образца № 1 определены соответствующие значения индукции:

$$B_s = \frac{\Psi_s}{w_2 \cdot s} = \frac{0,2415}{255 \cdot 0,00049} = 1,93 \text{ Тл};$$

$$B_r = \frac{\Psi_r}{w_2 \cdot s} = \frac{0,2}{255 \cdot 0,00049} = 1,6 \text{ Тл}.$$

По результатам измерения остаточной намагниченности после отключения первичного тока насыщенного ТТ, представленным в данном разделе, можно сделать следующие выводы:

- после отключения первичного тока ТТ индукция снижается благодаря переходному процессу во вторичном контуре ТТ в соответствии с характеристиками размагничивания;

- значение остаточной намагниченности не зависит от способа предварительного намагничивания (постоянным или переменным током) сердечника ТТ до уровня, соответствующего насыщению;

- при значениях сопротивления нагрузки в диапазоне от 10 до 120 % от номинального намагниченность сердечника ТТ гарантированно достигает установившегося значения (остаточного) уже через 10 с после

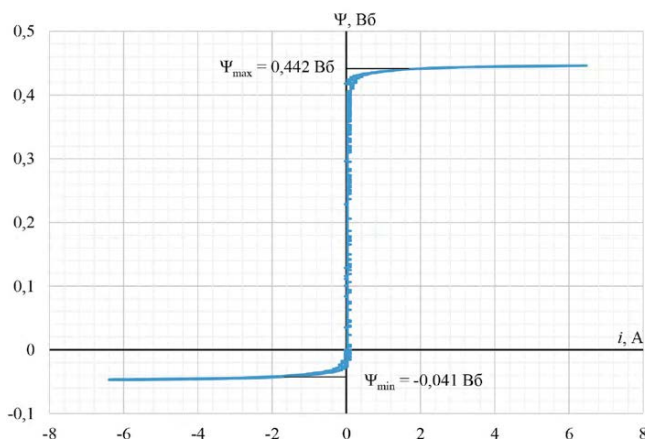


Рис. 12. Зависимость потокосцепления от тока в опыте перемагничивания постоянным током для образца №1

отключения первичного тока. Далее при отсутствии токов в обмотках ТТ значение остаточной индукции сохраняется неограниченно долго;

- значения остаточных индукций в сердечниках разных образцов физической модели ТТ в пределе отличаются на 6 % (минимальное значение 1,523 Тл, а максимальное – 1,62 Тл);

- значения коэффициента остаточной намагниченности для образца №1, полученные с помощью автоматизированного замера устройством СТ Analyzer и путем обработки цифровых осциллограмм тока и напряжения, отличаются не более чем на 3 %;

- в среднем значение остаточной намагниченности для физической модели ТТ, полученное методом переменного тока, выше на 10 %, чем значение, полученное через 10 с после отключения первичного тока насыщенного ТТ, во вторичную цепь которого включено сопротивление в диапазоне от 10 до 120 % от номинального.

Примечание: Указанное в предыдущем выводе объясняется тем, что в методе переменного тока фактически определяется не остаточная магнитная индукция, а значение индукции в точке пересечения нисходящей ветви предельной петли гистерезиса с осью ординат (при  $H = 0$ ). При этом перемагничивание сердечника происходит под действием принужденного синусоидального напряжения, приложенного к выводам вторичной обмотки ТТ. Хотя метод переменного тока и рекомендуется к применению стандартом МЭК 61869-2 [1], но в этом же стандарте указано, что остаточная магнитная индукция должна фиксироваться **после отключения тока** с амплитудным значением, обеспечивающим индукцию насыщения. А в описании самого метода переменного тока используется довольно аккуратное выражение: «Значение вторичного потока при нулевом значении тока, **как принято считать**, представляет собой предельное значение остаточной индукции». Таким образом, реальное значение остаточной намагниченности сердечника ТТ в условиях эксплуатации будет в среднем меньше на 10 % значения, полученного при измерении  $K_r$  методом переменного тока.

### Измерение коэффициента остаточной намагниченности после протекания нагрузочных токов в первичной обмотке предварительно насыщенного ТТ

Измерение остаточной намагниченности всех образцов физической модели выполнялось автоматизированным способом с помощью устройства СТ Analyzer для измерительной схемы, представленной на рис. 10. При этом в настройках устройства СТ Analyzer указывалось измерение в соответствии со стандартом МЭК 61869 - 2 [1].

Непосредственно перед опытом сердечник физической модели ТТ намагничивался постоянным током

длительностью 0,3 с и значением 15 А. Указанной длительности и значения импульса постоянного тока достаточно для приведения сердечника физической модели ТТ в насыщенное состояние.

Далее в первичную обмотку физической модели ТТ подавался синусоидальный ток с фиксированной длительностью и заданной начальной фазой. Испытания проводились при следующих значениях тока нагрузки: 10, 45 и 100 % от номинального вторичного тока ( $I_{2,ном}$ ) физической модели ТТ. В условиях испытаний кроме значения  $I_{2,ном}$  изменялось и сопротивление резисторов ( $R_H$ ), выполняющих роль нагрузки во вторичной цепи физической модели ТТ. Испытания выполнялись при следующих значениях  $R_H$ : 10, 60 и 120 % от номинального сопротивления нагрузки ( $R_{ном}$ ).

Различные сочетания  $I_H$  и  $R_H$  соответствуют определенным значениям амплитуды магнитной индукции ( $B_m$ ) в сердечнике ТТ. Значение  $B_m$  определяется с помощью следующего выражения:

$$B_m = \frac{I_H (R_2 + R_H)}{222 \cdot w_2 \cdot s}, \quad (6)$$

где  $R_2$  – активное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

$w_2$  – число витков вторичной обмотки ТТ;

$s$  – площадь сечения магнитопровода ТТ.

После отключения тока нагрузки в первичной цепи делалась пауза длительностью минимум 10 с. При этом сопротивление  $R_H$  оставалось подключенным к выводам вторичной обмотки, что соответствует реальным условиям эксплуатации ТТ. Опыты показали, что 10 с достаточно для затухания свободного процесса (см. выше), возникающего после отключения первичного тока и установления в сердечнике ТТ остаточной магнитной индукции ( $B_r$ ), значение которой далее при отсутствии токов в обмотках ТТ сохраняется неограниченно долго.

Результаты испытаний удобно оценивать с помощью коэффициента размагничивания, под которым понимается величина равная:

$$K_{разм} = \frac{B_{r, макс} - B_{r, изм}}{B_{r, макс}} \cdot 100\%, \quad (7)$$

где  $B_{r, макс}$  – максимальное значение остаточной индукции, равное  $B_{r, ср}$  полученному выше для каждого образца физической модели ТТ;

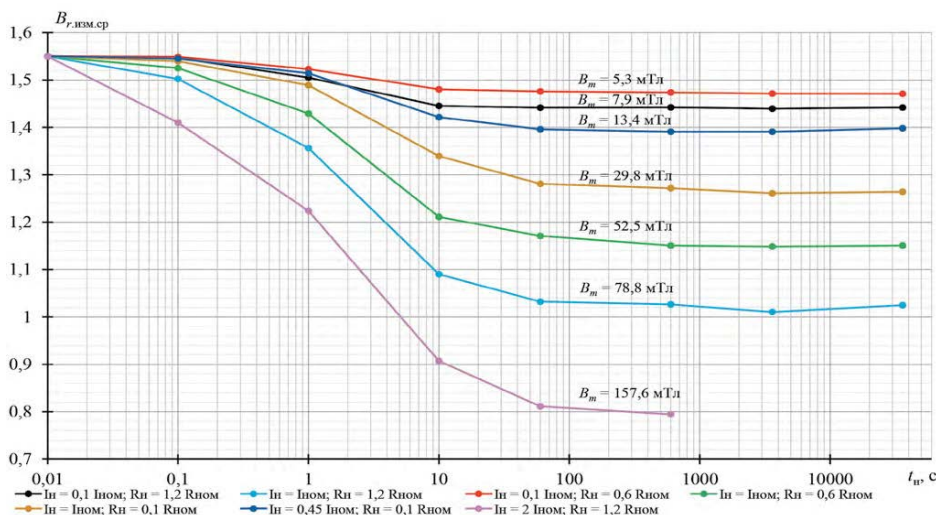


Рис. 13. Зависимость значения остаточной магнитной индукции в сердечнике образца №1 от времени протекания тока нагрузки

$B_{r,изм}$  – значение остаточной индукции, измененное после протекания тока нагрузки.

Процессы в магнитопроводе ТТ после протекания по первичной обмотке нагрузочных токов определяются следующими факторами:

- значение тока нагрузки ( $I_H$ ) и длительность его протекания ( $t_H$ );
- сопротивление резистора  $R_H$ . Индуктивная составляющая сопротивления нагрузки не рассматривается, так как в токовых входных цепях современных микропроцессорных терминалов РЗ ее значение пренебрежимо мало и в расчетах нагрузок не учитывается;
- начальная фаза тока нагрузки ( $\varphi_{нач}$ ).

Для более удобного восприятия результатов изменения коэффициента остаточной намагниченности после протекания нагрузочных токов в первичной обмотке построены следующие графики:

- зависимость значения остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ от времени протекания тока нагрузки:  $B_{r,изм,ср}(t_H)$  – рис. 13;
- зависимость коэффициента размагничивания от амплитуды магнитной индукции в сердечнике ТТ при протекании тока нагрузки в течение 10 минут:  $K_{разм}(B_m)$  – рис. 14;
- зависимость коэффициента остаточной намагниченности от относительного значения амплитуды магнитной индукции в сердечнике ТТ при протекании тока нагрузки в течение 10 минут:  $K_r(B_{m*})$  – рис. 15, где  $B_{m*}$  – относительного значения амплитуды магнитной индукции в сердечнике ТТ

$$B_{m*} = \frac{B_m}{B_{r, макс}} \cdot 100\%.$$

По результатам исследования влияния факторов можно сделать вывод, что решающий вклад в значение остаточной индукции вносят ЭДС вторичной обмотки ТТ и продолжительность протекания нагрузочного тока, т.е. вольт-секундный интеграл, пропорциональный амплитуде магнитной индукции в магнитопроводе ТТ и суммарная длительность протекания нагрузочного тока, соответствующая указанной амплитуде.

Амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе ТТ и длительность протекания тока нагрузки, соответствующего указанной амплитуде, приняты в качестве факторов, определяющих размагничивающее влияние (действие) токов нагрузки.

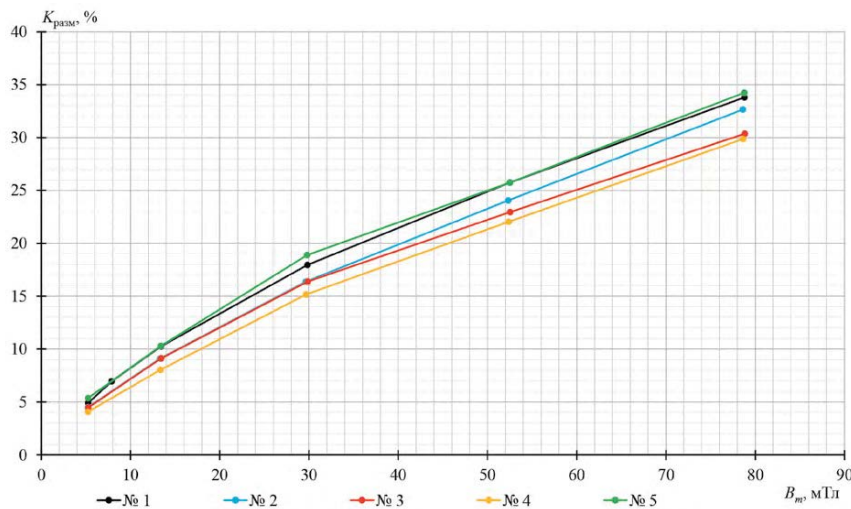


Рис. 14. Зависимость коэффициента размагничивания от амплитуды магнитной индукции в сердечнике ТТ при протекании тока нагрузки в течение 10 минут

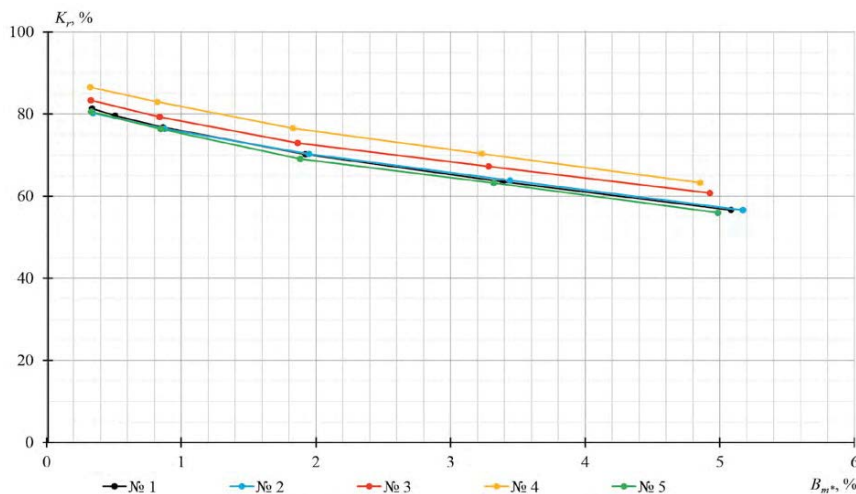


Рис. 15. Зависимость коэффициента остаточной намагниченности от относительного значения амплитуды магнитной индукции в сердечнике ТТ при протекании тока нагрузки в течение 10 минут

С целью оценки возможных значений коэффициента размагничивания в реальных условиях эксплуатации для нескольких типов высоковольтных ТТ класса Р были получены значения амплитуды магнитной индукции, соответствующие их номинальному режиму (см. Приложение 1). Из результатов указанного расчета следует, что значения амплитуды магнитной индукции, соответствующие номинальному режиму, для одноамперных ТТ изменяются в диапазоне от 29,6 до 99,3 мТл, а для пятиамперных – от 33,4 до 88,9 мТл. Однако, необходимо учитывать, что в условиях эксплуатации фактическое сопротивление нагрузки во вторичных цепях одноамперных ТТ может приближаться к номинальному значению только при подключении электромеханических устройств РЗ.

Для пятиамперных ТТ фактическое сопротивление нагрузки во вторичных цепях гораздо чаще приближается к номинальному значению, а иногда и превышает его.

По результатам измерения коэффициента остаточной намагниченности после протекания нагрузочных токов в первичной обмотке предварительно насыщенного ТТ, представленным в данном разделе, можно сделать следующие выводы:

- сердечник ТТ класса Р может размагничиваться синусоидальными токами нагрузки;
- решающий вклад в значение остаточной индукции вносят амплитуда магнитной индукции в магнитопроводе ТТ и суммарная длительность протекания нагрузочного тока, соответствующая указанной амплитуде;
- влияние токов нагрузки на значение остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ класса Р удобно оценивать с помощью коэффициента размагничивания, под которым понимается величина равная (7):

$$K_{\text{разм}} = \frac{B_{r,\text{max}} - B_{r,\text{изм}}}{B_{r,\text{max}}} \cdot 100\%;$$

- значение коэффициента размагничивания сердечника ТТ класса Р зависит от времени протекания тока нагрузки, его действующего (или амплитудного) значения и от сопротивления вторичной цепи;
- после десятиминутного интервала протекания указанного тока значение коэффициента размагничивания практически не изменяется;



- установившееся значение коэффициента размагничивания сердечника ТТ класса Р определяется амплитудой магнитной индукции (см. выражение (6)), возникающей в результате протекания тока нагрузки;

- влиянием начальной фазы и момента отключения тока нагрузки допустимо пренебречь. В наихудшем случае их влияние не превышает 10 % от установившегося значения коэффициента размагничивания сердечника ТТ класса Р;

- среднее значение коэффициента размагничивания для пяти образцов физической модели ТТ при амплитуде магнитной индукции, равной 80 мТл, составляет 32 %, что соответствует среднему значению коэффициента остаточной намагниченности равному 60 %;

- средние значения амплитуды магнитной индукции, соответствующие номинальному режиму работы ТТ класса Р, для одноамперных и пятиамперных ТТ приближаются к 60 мТл, что соответствует среднему значению коэффициента размагничивания 25 % и коэффициенту остаточной намагниченности равному 65 %;

- в эксплуатации при условии применения современных микропроцессорных терминалов РЗА коэффициент размагничивания сердечников пятиамперных ТТ класса Р может быть существенно выше, чем у одноамперных, и приближаться к значению 25 %.

Для образца физической модели №1 дополнительно были выполнены опыты по измерению коэффициента остаточной намагниченности после коммутаций нагрузочных токов в первичной обмотке предварительно насыщенного ТТ (см. Приложение 2). По результатам указанных опытов можно сделать следующий вывод: среднее значение коэффициента размагничивания практически не зависит от количества переключений, порядка чередования амплитуды тока нагрузки и наличия бестоковых пауз, а определяется максимальным значением амплитуды магнитной индукции, зафиксированным на рассматриваемом интервале времени, и длительностью ее присутствия.

### Выводы

1. Установлено, что сердечники ТТ класса Р размагничиваются синусоидальными токами нагрузки. Решающий вклад в значение остаточной индукции вносят:

- амплитуда магнитной индукции, обусловленная током нагрузки;

- суммарная длительность протекания указанного тока.

2. Среднее значение коэффициента размагничивания при значении амплитуды магнитной индукции, соответствующем номинальному режиму, составляет 25 – 30 %, что соответствует среднему значению коэффициента остаточной намагниченности равному 65 – 60 %.

3. В эксплуатации при условии применения современных микропроцессорных терминалов РЗА коэффи-

циент размагничивания сердечников пятиамперных ТТ класса Р может приближаться к значению 25 %. У одноамперных ТТ в указанных условиях коэффициент размагничивания составляет порядка 12 %.

4. При проверках и выборе ТТ класса Р для быстродействующих устройств РЗ значение коэффициента остаточной намагниченности 86 % целесообразно принимать только при учете режима АПВ. В остальных случаях целесообразно снизить требования к значению  $K_r$  для пятиамперных ТТ до 65 %, а для одноамперных до 75 %. При этом расчетное значение времени до насыщения ( $t_{нас}$ ) увеличится примерно в 2 и 1,5 раза, соответственно, если значение параметра режима А не превышает 12,5. При более высоких значениях А увеличение  $t_{нас}$  существенно зависит от значения постоянной времени затухания апериодической составляющей ( $T_p$ ) и может быть еще более значительным.

### Литература:

1. Стандарт. МЭК 61869-2. Издание 1.0 2012-09. Международный стандарт. Измерительные трансформаторы. Часть 2: Дополнительные требования для трансформаторов тока. Редакция 1.0 2012 – 09.
2. IEC 60044-6 (1992-03): Instrument Transformers, Part 6: Requirements protective current transformers for transient performance.
3. ПНСТ 283 – 2018. «Трансформаторы измерительные. Часть 2. «Технические условия на трансформаторы тока».
4. Стандарт МЭК 60255-121:2014. Измерительные реле и оборудование релейной защиты. Часть 121: Функциональные требования к дистанционной защите.
5. Дроздов А.Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М. – Л.: Изд. «Энергия», 1965 г.
6. Казанский В.Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматики. – М: Энергия, 1978.
7. Баев А.В. Остаточная индукция в трансформаторах тока релейной защиты // Электричество. – 1971. - № 7. - С. 4-9.
8. ГОСТ 802-58. Сталь электротехническая тонколистовая.
9. IEC 61869-100: 2017. Instrument Transformers. Part 100 Guidance for Application of Current Transformers in Power System Protection.
10. Поташев Н.П. Остаточная индукция в трансформаторах тока. // Вестник электропромышленности. – 1937. - № 3.
11. Сирота И.М. Переходные режимы работы трансформаторов тока // Л.В. Цукерник. – Киев: «АН УССР», 1961 г. – 192 с.
12. ГОСТ 21427.1-83. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая.
13. Сивков А.С., Щеглов Л.В., Ведерников Г.А., Петрова О.В. Дополнительные параметры трансформаторов тока для обеспечения надежной работы сети. // Энергоэксперт. – 2018. – № 3. – С. 44 – 47.
14. Циглер Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения. – Перевод с англ./Под ред. Дьякова А.Ф. – М.: Знак.2008. – 216 с.
15. ABB Automation Products AB. Руководство по применению REL 521\*2.3. Терминал дистанционной защиты линии.
16. Веников В.А. Теория и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. – М: Изд. «Высшая школа», 1966.
17. Кужеков С.Л. Физическое моделирование защитных трансформаторов тока. // Известия вузов. Электромеханика. – 1967. – № 10. – С. 1140-1143.
18. Каталог продукции Новолипецкого металлургического комбината. Прокат холоднокатаный тонколистовой из электротехнической анизотропной стали – <https://nlmk.shop/>.
19. Указания по расчету сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях релейной защиты. Кривые предельных кратностей трансформаторов тока. ГПИО «ЭНЕРГОПРОЕКТ» Всесоюзный Государственный проектно-исследовательский и научно-исследовательский институт энергетических сетей и электрических сетей «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ» Горьковское отделение. 1989 г.

Приложение 1. Результаты расчета амплитуды магнитной индукции в номинальном режиме работы реальных ТТ класса Р

Тип ТТ	$I_{2,ном}$ А	$R_{2r}$ Ом	$X_{2r}$ Ом	$z_{ном}$ Ом	$n_2$	$s_r$ м <sup>2</sup>	$B_{л,ном}$ мТл
Одноамперные							
ТФЗМ110Б-IV-1-88 400/1	1	7,6	0	30	1500	0,0011	99,3
ТФЗМ110Б-III-1-85 750/1	1	7,6	14,04	20	1500	0,00199	53,0
ТФЗМ110Б-III-1-85 2000/1	1	10,8	26,58	20	2000	0,00199	53,2
ТФЗМ220Б-IIIУ1-1-85 1200/1	1	7,6	0	50	1200	0,0031	68,1
ТВТ110-III-1-83 400/1	1	2,52	0	30	400	0,0056	64,5
ТВТ110-III-1-83 1000/1	1	5,88	0	30	1000	0,0042	37,4
ТВТ220-I-1-83 600/1	1	4,8	0	30	600	0,0086	29,6
ТВТ220-I-1-83 1000/1	1	8	2,21	60	1000	0,0086	35,5
ТГФ-500-II-УХЛ 2000/1	1	9,82	0	30	2000	0,0015	57,5
ТФЗМ-500Б-IV 2000/1	1	10	0	50	1185	0,00265	83,6
SAS 550/5G 2000/1	1	7,51	0	40	2000	0,001313	79,3
SAS-800/1G 3000/1	1	9,7	0	40	3000	0,00133	54,3
JK ELK CB3-780 4000/1	1	10,5	0	30	4000	0,00082	53,4
Пятиамперные							
ТФЗМ110Б-IV-5-88 400/5	5	0,7	0	1,2	240	0,0021	80,9
ТФЗМ110Б-III-1-85 750/5	5	0,55	0,21	0,8	300	0,00199	51,9
ТФЗМ110Б-III-1-85 2000/5	5	0,8	0,65	0,8	400	0,00199	51,8
ТФЗМ220Б-IIIУ1-1-85 1200/5	5	0,55	0,8	2	240	0,0031	88,9
ТВТ110-III-1-83 400/5	5	0,25	0	1,2	80	0,0056	70,8
ТВТ110-III-1-83 1000/5	5	0,43	0	1,2	200	0,0042	42,0
ТВТ220-I-1-83 600/5	5	0,39	0	1,2	120	0,0086	33,4
ТВТ220-I-1-83 1000/5	5	0,6	0	2,4	200	0,0086	38,0

Приложение 2. Результаты измерения коэффициента остаточной намагниченности после коммутаций нагрузочных токов в первичной обмотке насыщенного ТТ

Режим испытаний	$B_{г,изм.ср}$ Тл	$K_{г,r}$ %	$K_{р,изм}$ %
10 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 3 мин бестоковая пауза; 10 мин 0,1 $I_{ном}$	1,435	79,20	7,41
10 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл); 3 мин бестоковая пауза; 10 мин $I_{ном}$	1,021	56,36	34,11
10 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 3 мин бестоковая пауза; 10 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл)	1,020	56,30	34,18
10 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 10 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл)	0,999	55,16	35,52
5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 5 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл); 5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 5 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл)	0,987	54,49	36,30
5 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл); 5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 5 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл); 5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл)	1,036	57,16	33,18
5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 5 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл); 5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл); 5 мин $I_{ном}$ (78,8 мТл); 5 мин 0,1 $I_{ном}$ (7,9 мТл)	1,009	55,67	34,92