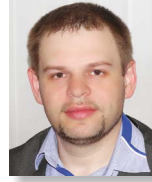


УДК 621.313.333

А.В. ДРОБОВ,
м.т.н., начальник учебно-методического центра профессионального образования ГУО «Гомельский областной институт развития образования», Гомель, Беларусь, electr_to@mail.ru



В.Н. ГАЛУШКО,
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» БелГУТ, Гомель, Беларусь, 5355628@mail.ru



И.Л. ГРОМЫКО,
м.т.н., ассистент кафедры «Электротехника» БелГУТ, Гомель, ivangromyko95@mail.ru



МОДЕЛЬ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ

Аннотация

В статье описана технология определения межвитковых замыканий с помощью результатов численного моделирования дифференциальных уравнений, основанная на экспериментальном определении параметров схемы замещения однофазных трансформаторов при межвитковых замыканиях. Разработанный математический инструментарий на основе данной схемы позволит модельным способом получать выборки для обучения сверточных нейронных сетей, унифицировать процедуру исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать ее под различное конструктивное исполнение.

Ключевые слова: инструментальный контроль, техническая диагностика, электрооборудование, надежность, автоматизированные диагностические системы, сверточные нейронные сети, силовые трансформаторы, схема замещения трансформатора

Annotation

The article describes the technology for determining interturn short circuits using the results of numerical modeling of differential equations, based on the experimental determination of the parameters of the equivalent circuit of single-phase transformers for interturn short circuits. The developed mathematical tools based on this scheme will allow us to obtain samples for training convolutional neural networks using a model method, unify research for transformers of various powers and easily adapt them to different designs.

Keywords: instrumental control, technical diagnostics, electrical equipment, reliability, automated diagnostic systems, convolutional neural networks, power transformers, transformer equivalent circuit

*Статья поступила в редакцию
5 апреля 2024 года*

Актуальность

Экономическая ситуация, сложившаяся в электроэнергетике в последние годы, заставляет принимать меры, направленные на увеличение срока службы различного оборудования. Одной из первоочередных задач является внедрение эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики состояния электрооборудования, что должно повысить надежность электрических сетей и энергоэффективность отрасли в целом.

Неотъемлемым элементом централизованного электроснабжения является силовой трансформатор. Выход его из строя может привести к аварийной ситуации, отключению электроэнергии, массовому недопроизводству, сопровождающимся значительным экономическим и экологическим ущербом. Поэтому мониторинг состояния трансформаторов является важной задачей.

Сегодня диагностика неисправностей трансформатора – это длительное и дорогостоящее мероприятие. Часто приходится проводить ряд сложных дополнительных тестов, так как применяемые методы диагностики не всегда позволяют однозначно установить место и тип дефекта.

Надежность трансформатора во многом определяется надежностью обмоток, которая, в свою очередь, зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто очень неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации, хранения и транспортировки трансформаторы подвергаются различным внешним воздействиям, что со временем приводит к ухудшению свойств изоляции.

Старение изоляции, перенапряжения, а также плохая организация производства и эксплуатации являются основными причинами межвитковых замыканий (МКЗ) в трансформаторах.

Следует отметить, что в последние годы разработан ряд методов диагностики трансформаторного оборудо-

вания, которые при комплексном использовании позволяют адекватно оценить состояние обследуемого объекта с достоверностью до 98 % [1]. Несмотря на это, количество трансформаторов, «доживающих» до отказа из-за термохимического старения твердой изоляции, составляет, по разным источникам, от 7 % до 20 % [2]. То есть остальные 80–93 % отказов трансформаторов вызваны различными дефектами, которые не были вовремя обнаружены.

Такая ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики. Эта схема, базирующаяся на плановых комплексных осмотрах, была разработана для условий экономики СССР, принципы которой исключали возможность эксплуатации большого количества оборудования сверх проектного срока. Соответственно, периодичность проведения комплексных проверок выбиралась исходя из вероятности возникновения и скорости развития дефектов в трансформаторах со сроком эксплуатации до 25 лет и не учитывала особенности протекания этих процессов в старом оборудовании.

Как следствие, в современных условиях все чаще встречаются случаи, когда за время межповерочного интервала дефект успевает развиться и привести к аварийному выходу трансформатора из строя. В то же время простое сокращение интервала приводит к недопустимому увеличению стоимости диагностики, что говорит о необходимости перехода к новой, эффективной схеме диагностирования неисправностей трансформаторов, предполагающей осуществление техобслуживания оборудования по фактическому состоянию. С этой целью ведется активная разработка и внедрение автоматизированных комплексных диагностических систем, позволяющих оценить текущее техническое состояние оборудования в различных режимах, без его отключения [3, 4]. Такие системы помогают выявлять дефекты на ранних стадиях развития, формировать технические рекомендации по продлению срока службы, планировать циклы сервисного обслуживания и ремонта.

При этом следует помнить, что нецелесообразно полностью отказываться от планового технического диагностирования. Оно позволяет решить следующие задачи: повысить надежность и увеличить срок службы эксплуатируемых трансформаторов; сократить время ремонтов и снизить стоимость ремонтных работ; оптимизировать количество запасных частей на предприятиях; исключить повторные дефекты.

Основная часть

Ряд авторов [5] доказывает экономическую целесообразность профилактических испытаний и непрерывного мониторинга силового электрооборудования. Однако такой подход требует решения ряда проблем.

Современные автоматизированные системы диагностики трансформаторов и электрических машин чаще всего разрабатываются для конкретного типа оборудования, а их адаптация к оборудованию другой мощности или другого конструктивного исполнения требует трудоемкой настройки библиотек баз данных и значительной технической дора-

ботки. Избежать этого можно за счет использования самообучающихся интеллектуальных систем, позволяющего:

- унифицировать диагностические исследования без необходимости создания библиотек баз данных для каждого типа трансформаторов;
- оптимизировать процесс диагностики благодаря простоте практического применения и исключению человеческого фактора при анализе результатов;
- улучшить качество диагностики. С увеличением количества исследований вероятность ошибки снижается, а системный подход (оценка множества факторов в динамике) повышает точность прогноза.

В связи с этим разработана и исследована основанная на системном универсальном подходе высокоэффективных комплексов для диагностического контроля состояния трансформаторов и их непосредственное применение в технологическом процессе обслуживания представляет собой действительно актуальную научно-техническую проблему для современной системы электроснабжения потребителей, одним из которых является железнодорожный транспорт.

Авторами разработана универсальная диагностическая система определения и классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса изоляции обмоток на основе сверточных нейронных сетей (СНС) для трансформаторов нетягового электроснабжения устройств сигнализации, централизации и блокировки межсистемных линий предприятий железнодорожных электросетей [6].

Традиционные методы испытаний включают в себя измерение различных параметров, таких как:

- полное сопротивление короткого замыкания (КЗ);
- потери холостого хода (ХХ);
- коэффициент трансформации;
- ток намагничивания;
- сопротивление обмоток.

Современные диагностические системы, применяемые на ряде энергообъектов Беларуси, позволяют измерять все вышеперечисленные параметры, а также динамическое сопротивление посредством одного прибора [7]. Однако при всех безусловных достоинствах эти системы имеют ряд существенных недостатков:

- предназначены для решения конкретных задач (для определенных схем, типов оборудования и т.д.);
- используют разнородную и разнотипную информацию;
- не учитывают изменения критериев диагностики оборудования.

Иными словами, эти диагностические системы необучаемы. Применение самообучающихся систем на основе искусственных нейронных сетей устраняет перечисленные недостатки.

Базируясь на данных исследований, авторы описывают методику определения МКЗ, основанную на измерении параметров схемы замещения однофазных трансформаторов. Полученные результаты измерений токов ХХ с применением СНС позволили унифицировать процедуру диагностического исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать ее под разное конструктивное исполнение.

К основным уравнениям трансформатора, работающего под нагрузкой, относятся уравнения напряжений его первичной и вторичной обмоток

$$U_1 = (-E_1) + I_1 Z_1, \quad U_{12} = E_2 - I_2 Z_2,$$

а также уравнение токов

$$I_1 = I_0 + (-I'_2).$$

Здесь для первичной и вторичной обмоток трансформатора соответственно: E_1, E_2 – ЭДС, В; I_1, I_2 – ток, А; $Z_1 = r_1 + jx_1, Z_2 = r_2 + jx_2$, где r_1, r_2, x_1, x_2 – активное и индуктивное сопротивления, Ом; j – плотность тока, А/м; I_0 – ток намагничивания, А.

Основные уравнения трансформатора могут отображаться либо аналитически в виде векторных уравнений, либо графически в виде векторных диаграмм.

Входное сопротивление трансформатора $Z_{вх}$ можно представить в виде определенной электрической схемы, называемой *схемой замещения трансформатора*. Ее легко получить, анализируя три приведенных выше уравнения.

Так как число витков первичной и вторичной обмоток у трансформатора разное, то ЭДС и токи в этих обмотках также неодинаковы. Поэтому сопоставлять эти величины или строить векторные диаграммы, где параметры первичной и вторичной обмоток суммируются, нельзя. Для устранения этого неудобства при исследовании трансформатора принято приводить все параметры вторичной обмотки к числу витков первичной. Приведенные параметры обозначаются штрихом.

Сопротивлению $Z_{вх}$ соответствует Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 1, а. Здесь сопротивление $Z_0 = r_0 + jx_0$ называется сопротивлением ветви намагничивания. Его активная составляющая r_0 – это фиктивное сопротивление, обусловленное потерями в стали трансформатора, а реактивная составляющая x_0 – индуктивное сопротивление взаимной индукции, обусловленное магнитным сопротивлением основному потоку трансформатора.

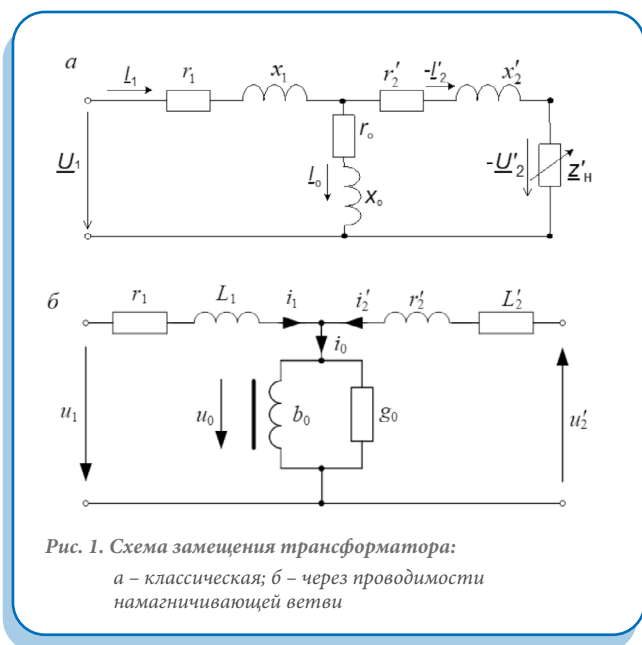
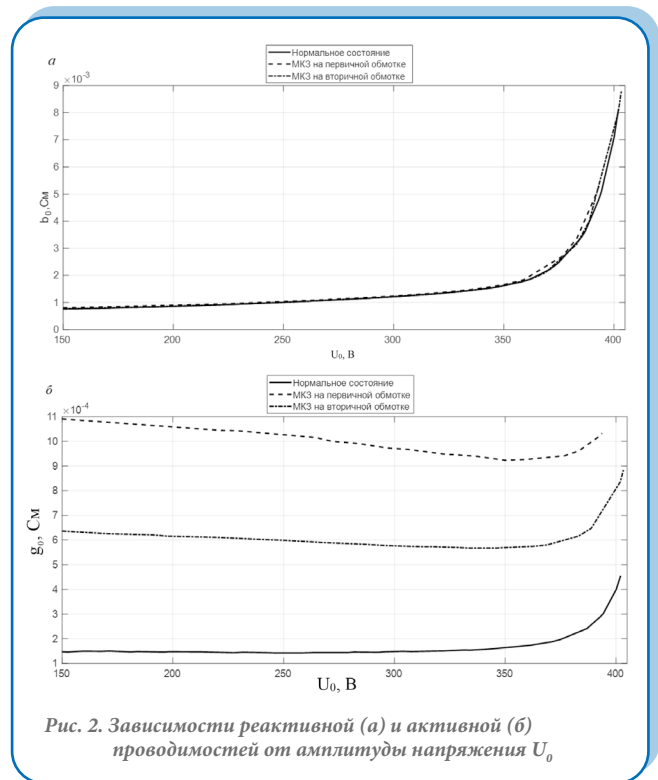


Таблица 1. Паспортные данные путевого трансформатора ТС-280Р

Параметры трансформатора	Число витков	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Напряжение в режиме ХХ, В
Первичная обмотка	548	220,0	1,5	–
Вторичная обмотка	361	138,4	2,4	145,3



Зная схему замещения трансформатора, параметры которой (за исключением нагрузки) практически постоянны, несложно провести исследование трансформатора при любой нагрузке. Сами же параметры схемы замещения можно определить с помощью опытов ХХ и КЗ.

В качестве примера исследовался путевой железнодорожный трансформатор ТС-280Р с паспортными данными, приведенными в таблице 1.

Для анализа процессов, происходящих в трансформаторе при МКЗ, используем Т-образную схему замещения с представлением ветви намагничивания через проводимости (рис. 1, б [8]).

Для учета нелинейных характеристик трансформатора выполнялись опыты ХХ. На основе их результатов получены зависимости реактивной (b_0) и активной (g_0) проводимостей от амплитуды подводимого к первичной обмотке напряжения U_0 (рис. 2).

Как можно видеть на рисунке 3, а, при МКЗ на небольшом числе витков реактивная проводимость практически не изменяется по сравнению с нормальным состоянием. Активная проводимость g_0 при МКЗ (потери на вихревые токи и гистерезис) изменяется непропорционально квадрату амплитуды магнитной индукции (рис. 3, б).

Для построения и моделирования схем замещения в системе компьютерной математики Matlab вместо ак-

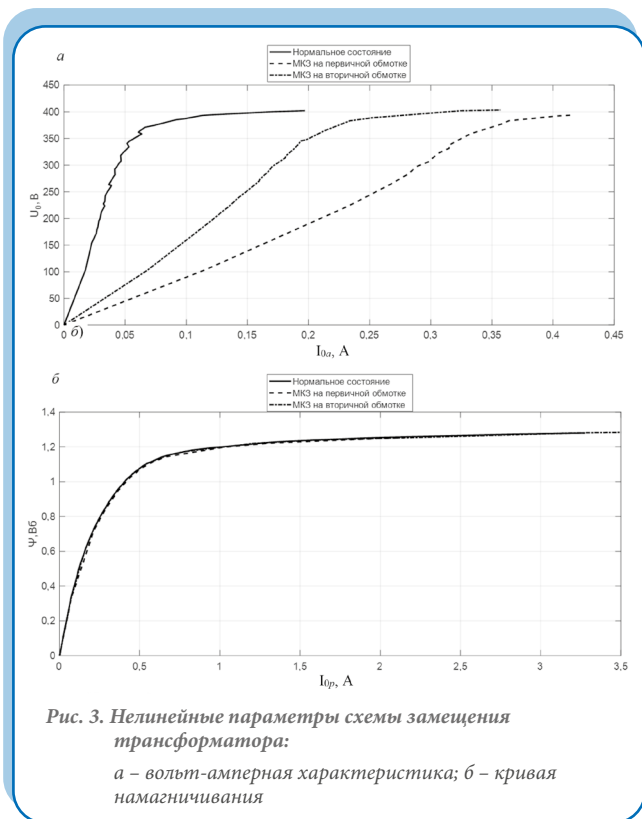


Рис. 3. Нелинейные параметры схемы замещения трансформатора:

а – вольт-амперная характеристика; б – кривая намагничивания

тивной проводимости g_0 была использована вольт-амперная характеристика (рис. 3, а), а вместо реактивной проводимости b_0 – кривая намагничивания (рис. 3, б), где I_{0a} и I_{0p} – активная и реактивная составляющие тока намагничивания I_0 .

В ходе проведения опыта ХХ для нормального состояния и для МКЗ на различных обмотках были получены результаты, представленные в таблице 2. Для определения параметров рассеивания в обмотках был проведен опыт КЗ с использованием RLC-метра (таблица 3).

Как видно из данных таблицы 3, для небольшого количества короткозамкнутых витков сопротивление $r_{кз}$ и ин-

Таблица 2. Результаты опытов холостого хода

Состояние	Измерено при $U_1 = U_{1н}$					Вычислено k
	U_1	U_{20}	P_0	I_0	$\cos\phi_0$	
	В	В	Вт	А		
Нормальное	220,0	145,7	7,4	0,28	0,12	1,509
МКЗ на первичной обмотке	219,9	146,0	43,0	0,34	0,57	1,506
МКЗ на вторичной обмотке	219,9	144,9	23,3	0,30	0,40	1,519

Таблица 3. Результаты опытов короткого замыкания

Состояние	Измерено		Вычислено			
	$r_{кз}$	$L_{кз}$	r_1	L_1	r_2	L_2
	Ом	мГн	Ом	мГн	Ом	мГн
Нормальное	9,610	5,838	4,805	2,919	2,107	1,280
МКЗ на первичной обмотке	9,390	5,790	4,695	2,895	2,070	1,276
МКЗ на вторичной обмотке	9,600	5,836	4,800	2,918	2,079	1,264

дуктивность $L_{кз}$ в нормальном состоянии и при МКЗ существенно не отличаются.

Для верификации приведенных в таблице 3 параметров схемы замещения также учитывались следующие закономерности (значимо влияющие исходные факторы – число витков обмоток, температура и длина провода):

1) активное сопротивление обмоток трансформатора в общем виде

$$r = w l_{cp} / (\rho_{20} S \cdot 10^3),$$

где w – количество витков в обмотке; l_{cp} – средняя длина витка, м; ρ_{20} – удельная электрическая проводимость, См/м; S – площадь поперечного сечения провода, мм².

Здесь также следует учесть небольшое увеличение активного сопротивления вследствие роста температуры в месте МКЗ;

2) индуктивное сопротивление обмоток трансформатора в общем виде

$$x = 1,58 f l w^2 \lambda \cdot 10^8,$$

где l – длина сердечника, м; λ – нелинейный коэффициент проводимости рассеяния поля.

На основании опытов ХХ и КЗ было выполнено моделирование трансформатора в нормальном состоянии и при МКЗ с помощью программы Simulink. Полученные схемы замещения трансформатора и результаты моделирования в режиме ХХ представлены на рисунке 4.

Как видно из полученных результатов (см. рис. 4), модель полностью согласуется с результатами экспериментов, причем не только в областях ХХ и КЗ, но и во всем спектре нагрузки между ними. Это говорит о возможности в дальнейшем получать нужные результаты с помощью данной модели, не прибегая к натурным экспериментам. Также на основании полученных схем замещения можно исследовать переходные процессы, возникающие в момент включения трансформатора, формы кривых различных напряжений и токов в установившемся режиме работы, а также проводить частотные анализы.

Для приборного диагностирования МКЗ на основе вышеприведенных формул и схем замещения в программе Simulink можно использовать ток намагничивания. Он отчетливо демонстрирует значимые отклонения от нормального режима ХХ при МКЗ на разных обмотках. На рисунке 5 показаны графики установившихся процессов тока намагничивания в режиме ХХ, с помощью которых авторы обучили имеющийся комплекс для диагностики неисправностей трансформаторов на основе СНС [6]. Полученные результаты позволяют дополнить и расширить возможности комплекса в части диагностики трансформаторов, испытываемых на наличие МКЗ, за счет определения поврежденной обмотки и количества поврежденных витков не только при непре-

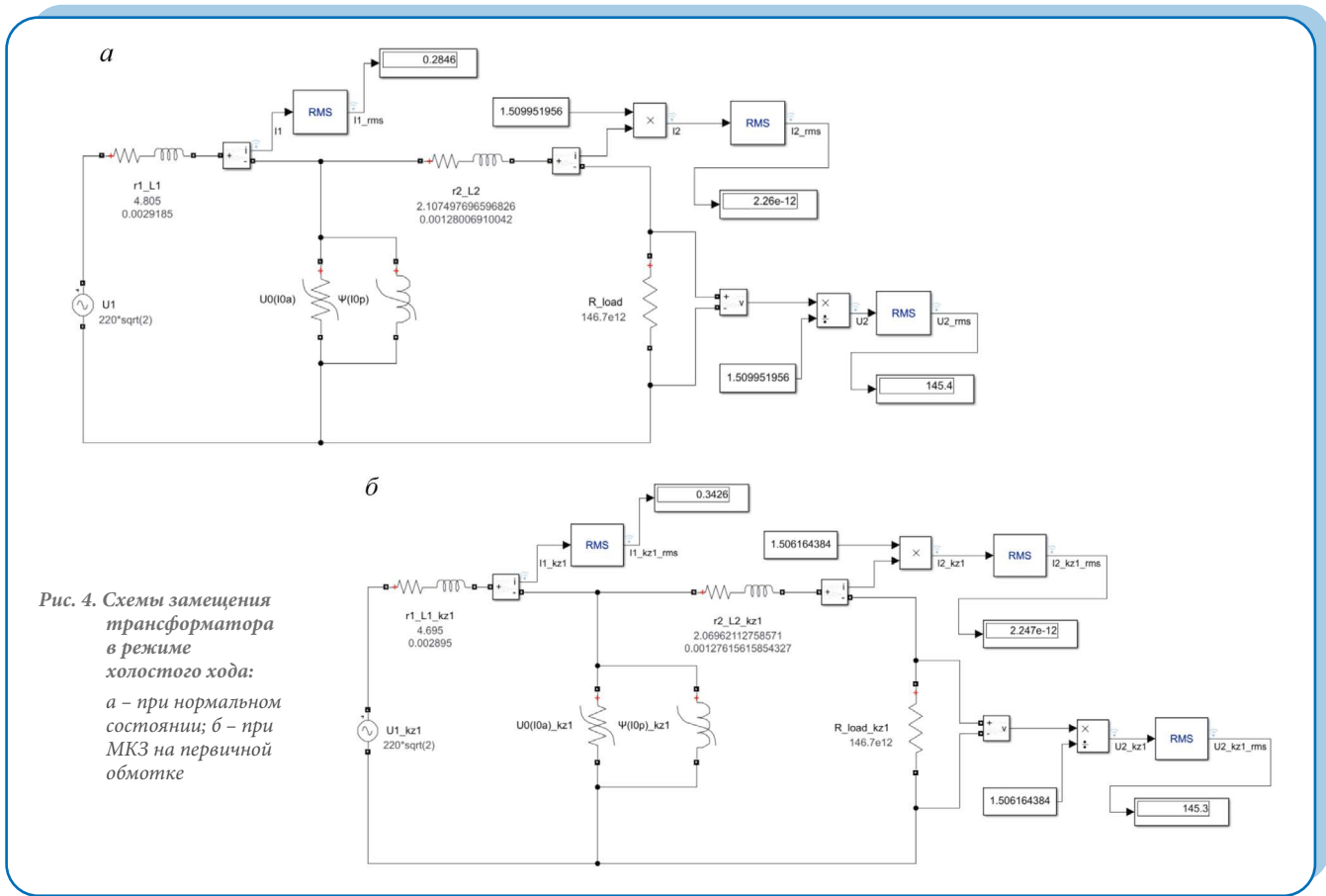


Рис. 4. Схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода: а – при нормальном состоянии; б – при МКЗ на первичной обмотке

равных измерениях, но и при подключении в режиме ХХ по заявкам предприятий.

- унифицировать исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение.

Заключение

Рассмотренный математический инструментарий на основе схемы замещения с проводимостями для межвитковых замыканий трансформаторов позволяет решать следующие задачи:

- выполнять анализ электромагнитных процессов для настройки оборудования и аппаратов защиты;
- получать модельным способом выборки для обучения сверточных нейронных сетей;
- исследовать переходные процессы, возникающие в момент включения трансформатора, и проводить частотные анализы;

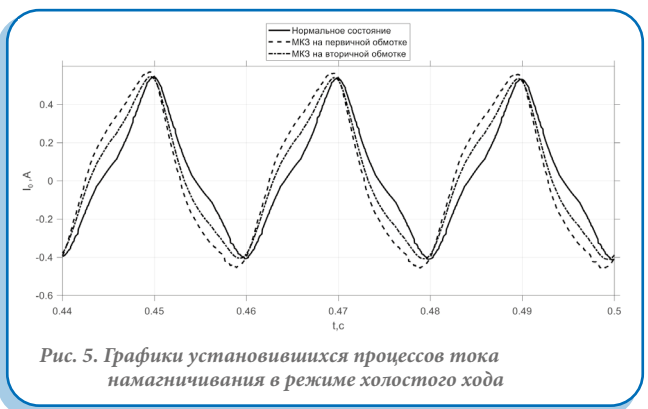


Рис. 5. Графики установившихся процессов тока намагничивания в режиме холостого хода

Список литературы

1. Трансформаторы силовые. Общие технические условия: ГОСТ 11677-85. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 39 с.
2. Попов, Г.В. Алгоритм комплексной диагностики масляных трансформаторов / Г.В. Попов, Ю.Ю. Рожожников // Электрические станции. – 2003. – № 8. – С. 54–59.
3. Комбинированные системы сбора и передачи технологической и диагностической информации АСУТП электроустановок / А.Н. Васев [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 11–12. – С. 16–26. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-16-26>
4. Кубарев, А.Ю. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования / А.Ю. Кубарев, А.Б. Акирова, Ю.Е. Кубарев // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 3–4. – С. 108–115. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-3-4-108-115>
5. Gaser, H.P. Condition Assessment of the Cellulosic Insulation from Power Transformers Taken out of Service / H.P. Gaser, B. Heireich, C. Krause // Proc. of the Inter. Symp. on High Voltage Engineering, Beijing (China), 25–29 August 2005.
6. Громыко, И.Л. Диагностический комплекс трансформаторов и его применение с помощью сверточных нейронных сетей / И.Л. Громыко, В.О. Белькин, В.Н. Галушко // Вестн. БелГУта: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 92–96.
7. Omicron [Электронный ресурс] // Диагностические испытания и мониторинг силовых трансформаторов. – Гомель, 2023. – Режим доступа: <https://www.omicronenergy.com>. – Дата доступа: 18.01.2023.
8. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники: учеб. для вузов / К.С. Демирчян, Л.П. Нейман, Н.В. Коровкин. – 5-е изд. – Т. 2. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.: ил.