

УДК 621.3

И. Л. ГРОМЫКО, магистр технических наук, В. А. ПАЦКЕВИЧ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ ПРИ МЕЖВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ОСНОВЕ Т-ОБРАЗНОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Описана технология определения межвитковых замыканий, основанная на экспериментальном определении параметров схемы замещения однофазных трансформаторов при межвитковых замыканиях. Разработанный математический инструментальный на основе схемы замещения при межвитковых замыканиях позволит получать модельным способом выборки для обучения сверточных нейронных сетей, унифицировать исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать их под различное конструктивное исполнение. Полученная математическая модель на основе схемы замещения при межвитковых замыканиях позволяет с помощью моделирования создавать выборки для обучения сверточных нейронных сетей.

Экономическая ситуация в электроэнергетике вынуждает нас принимать меры, направленные на увеличение срока службы оборудования. Решение проблемы оценки технического состояния электрооборудования в электрических сетях во многом связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики, что в целом повышает энергоэффективность отрасли.

Основными задачами исследования являются:

- диагностика на ранних стадиях развития неисправностей и их классификация с одновременной локализацией;
- разработка математических, имитационных и нейронных моделей для обучения и выбора параметров защиты новых трансформаторов;
- разработка множественной регрессии и нейронных моделей для оценки остаточного ресурса на основе анализа экспериментов.

Неотъемлемым элементом электроснабжения является трансформатор. Выход из строя силового трансформатора может привести к аварийным ситуациям, отключению электроэнергии, массовому недопроизводству, сопровождающемуся значительным экономическим и экологическим ущербом. Поэтому контроль состояния трансформаторов является важной задачей.

Сегодня диагностика трансформаторов – это длительное и дорогостоящее мероприятие. Часто приходится проводить целый ряд сложных испытаний, поскольку современные методы диагностики не всегда четко указывают на место и тип дефекта. Надежность электрической машины во многом определяется надежностью обмоток, которая, в свою очередь, зависит от состояния изоляции. Изоляция работает в сложных, часто очень неблагоприятных условиях. В процессе эксплуатации электрических машин, а также при их хранении и транспортировке они подвергаются различным внешним воздействиям, что со временем приводит к постепенному ухудшению свойств изоляции.

Основными причинами межвитковых замыканий в трансформаторах являются старение изоляции, перенапряжение или плохая организация производства и эксплуатации.

Следует отметить, что в последние годы проделана большая работа по созданию методов диагностики

трансформаторного оборудования, которые при комплексном использовании позволяют адекватно оценить состояние обследуемого объекта с точностью до 98 % [1]. Однако, несмотря на это, количество трансформаторов, которые «выживают» после отказов, связанных с термохимическим старением твердой изоляции, составляет, по разным данным, от 7 до 20 % [2]. Иными словами, от 80 до 93 % отказов трансформаторов вызваны различными дефектами, которые не были своевременно обнаружены. Такая ситуация обусловлена низкой эффективностью традиционной схемы диагностики.

Традиционная схема (плановые комплексные осмотры) была разработана для условий плановой экономики СССР, принципы которой исключали возможность эксплуатации большого количества оборудования сверх проектного срока. Соответственно, период проведения комплексных проверок выбирался с учетом вероятности возникновения и скорости развития дефектов в трансформаторах со сроком службы до 25 лет и не учитывал особенностей развития дефектов в старом оборудовании. В результате в современных условиях всё 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 межповерочного интервала приводит к недопустимому увеличению стоимости диагностики, что говорит о необходимости разработки эффективной системы диагностики неисправностей в современных условиях.

Следует помнить, что плановая техническая диагностика позволяет решить следующие задачи: повысить надежность работы трансформаторов; сократить время ремонта; уменьшить количество запасных частей на предприятиях; увеличить срок службы трансформаторов; снизить стоимость ремонтных работ; устранить повторные дефекты.

Для того чтобы можно было проводить техническое обслуживание оборудования исходя из его фактического состояния, ведется активная разработка и внедрение автоматизированных комплексных систем диагностики и диагностирования, позволяющих в различных режимах, не выключая оборудование, оценивать его текущее техническое состояние [3, 4]. Такие

системы помогают выявлять различные виды дефектов, некоторые из них помогают формулировать технические рекомендации по продлению срока службы, планировать циклы обслуживания и ремонта.

Ряд авторов [5] доказывают экономическую целесообразность профилактических испытаний и непрерывного мониторинга силового электрооборудования.

Современные автоматизированные системы диагностики трансформаторов и электрических машин чаще всего разрабатываются для конкретного типа оборудования, и их применение к другим типам оборудования требует трудоемкой настройки библиотеки баз данных и значительного технического развития. Избежать этого недостатка можно за счет использования самообучающихся интеллектуальных систем. Использование ИНС позволяет унифицировать диагностические исследования без необходимости создания библиотек баз данных для каждого типа трансформаторов. Использование этих систем также оптимизировано благодаря простоте практического применения и исключению человеческого фактора при анализе результатов. С увеличением количества исследований вероятность ошибки снижается, а системный подход (оценка многих факторов во времени) повышает точность прогноза.

В связи с этим разработка и исследование высокоэффективных систем диагностического мониторинга состояния трансформаторов, основанных на системном универсальном подходе, и возможность непосредственного применения разработанных диагностических систем в технологическом процессе обслуживания является действительно актуальным научно-техническим вопросом современной системы электроснабжения потребителей железнодорожного транспорта.

Авторами разработана универсальная диагностическая система идентификации и классификации неисправностей трансформаторов и оценки остаточного ресурса изоляции обмоток на основе конволюционных нейронных сетей для трансформаторов нетяговых электросетей сигнализации, централизации, межсистемных линий, предприятий железнодорожных электрических сетей [6].

Традиционные методы испытаний включают в себя измерение различных параметров, таких как сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, ток намагничивания и сопротивление обмотки.

Современные диагностические системы компании OMICRON – одного из ведущих мировых производителей диагностического оборудования для электроэнергетики, такие как TESTRANO 600 [7], позволяют измерять сопротивление короткого замыкания, потери холостого хода, коэффициент трансформации, намагничивающий ток, сопротивление обмоток и динамическое сопротивление устройства РПН в одном приборе. Управление системой может осуществляться с помощью TESTRANO Touch Control на встроенном дис-

плее или с помощью программного обеспечения Primary Testing Manager TM на компьютере. Система используется для плановых и выездных диагностических проверок, а также для проведения заводских приемо-испытаний (FAT).

Таким образом, при всех безусловных достоинствах используемых в Беларуси систем, они имеют ряд существенных недостатков: направлены на решение конкретной задачи (для конкретных схем, конкретного оборудования и т. д.); используется разнородная и разнотипная информация; не учитывается динамика изменения критериев диагностики оборудования, иными словами, системы не обучаемы. Поэтому использование самообучающихся систем на основе ИНС устраняет перечисленные недостатки.

На основе проведенных исследований авторы описывают технологию определения межвитковых замыканий (IVF), основанную на измерении параметров эквивалентной схемы однофазных трансформаторов. Полученные результаты измерения токов холостого хода с использованием сверточных нейронных сетей (CNN) позволили унифицировать исследования для трансформаторов различной мощности и легко адаптировать их к различным конструкциям.

К основным уравнениям трансформатора, работающего под нагрузкой, относятся уравнения напряжений его первичной и вторичной обмоток, а также уравнение токов в комплексной форме записи:

$$\begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_1 z_1; \\ U'_2 &= E'_2 - I'_2 k^2 z_2; \\ I_1 &= I_0 + (-I'_2), \end{aligned}$$

где z_1, z_2 – комплексное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора.

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

Входное сопротивление трансформатора можно представить в виде определенной электрической схемы, называемой схемой замещения трансформатора, которую легко получить, анализируя три указанных выше уравнения трансформатора.

Так как числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора разные, то ЭДС и токи в этих обмотках также неодинаковы. Поэтому сопоставлять эти величины или строить векторные диаграммы, где величины первичной и вторичной обмоток нужно суммировать, нельзя. Для устранения этого неудобства при исследовании трансформатора принято приводить все параметры вторичной обмотки к числу витков первичной. Приведенные параметры обозначаются индексом штрих

$$\begin{aligned} I'_2 &= I_2 / k; U'_2 = kU_2; r'_2 = k^2 r_2; x'_2 = k^2 x_2; \\ U_1 &= I_1 z_{\text{ВХ}} = I_1 \left(z_1 + \frac{(z'_2 + z_{\text{Н}}) z_0}{z_0 + z'_2 + z_{\text{Н}}} \right); \end{aligned}$$

Сопротивлению \underline{z}_{BX} соответствует Т-образная схема замещения, представленная на рисунке 1, а. Здесь сопротивление $\underline{z}_0 = r_0 + jx_0$ называется сопротивлением ветви намагничивания.

Активная его составляющая r_0 – это фиктивное сопротивление, обусловленное потерями в стали трансформатора. Реактивное сопротивление x_0 – индуктивное сопротивление взаимоиндукции, обусловленное магнитным сопротивлением основному потоку трансформатора.

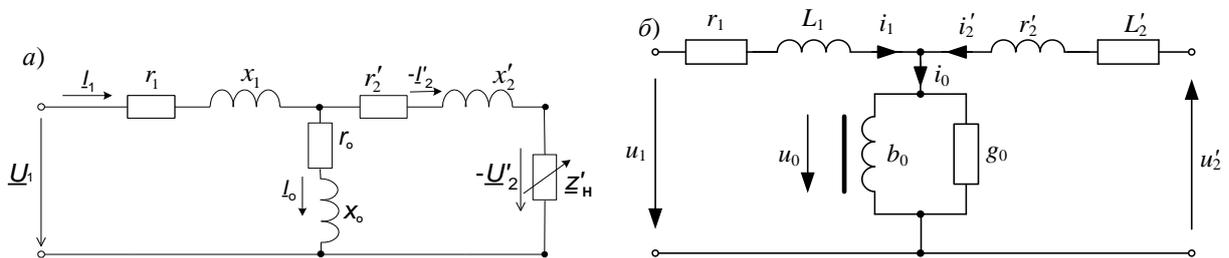


Рисунок 1 – Схема замещения трансформатора:
а – классическая; б – через проводимости намагничивающей ветви

Зная схему замещения трансформатора, параметры которой, за исключением нагрузки, практически постоянны, несложно производить исследование трансформатора при любой нагрузке. Сами же параметры схемы замещения можно определить с помощью опыта холостого хода и опыта короткого замыкания.

В качестве примера для статьи исследовался путевой железнодорожный трансформатор ТС-280Р со следующими паспортными данными: номинальное напряжение на первичной обмотке – 220 В; номинальный ток на первичной обмотке – 1,5 А; номинальное напряжение на вторичной обмотке – 138,4 В; номинальный ток на вторичной обмотке – 2,4 А;

напряжение на вторичной обмотке в режиме холостого хода – 145,3 В; число витков первичной обмотки – 548; число витков вторичной обмотки – 361.

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

Для учета нелинейных характеристик трансформатора выполнялись опыты холостого хода, на основании которых получены зависимости реактивной (b_0) и активной (g_0) проводимостей от амплитуды подводимого к первичной обмотке напряжения U (рисунок 2).

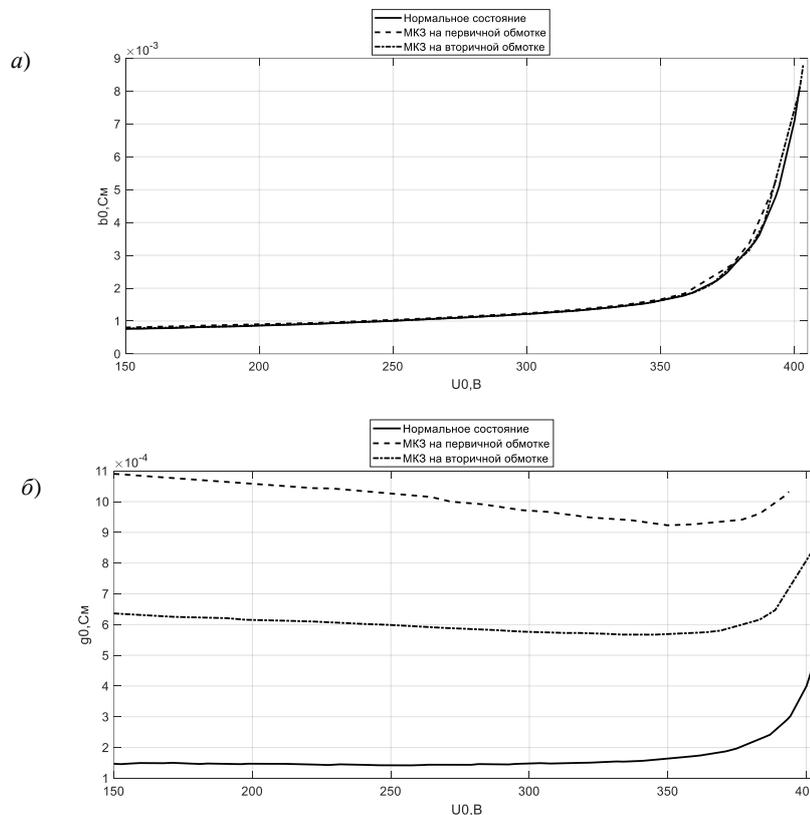


Рисунок 2 – Зависимости реактивной (а) и активной (б) проводимостей от амплитуды напряжения U_0

Как можно видеть из рисунка 2, 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 (см. рисунок 2, б).

Для построения и моделирования схем замещения в системе компьютерной математики Matlab вместо активной проводимости g_0 была использована вольт-амперная характеристика (рисунок 3, а), а вместо реактивной проводимости b_0 – кривая намагничивания (рисунок 3, б), где I_{oa} и I_{op} – активная и реактивная составляющие тока намагничивания I_o .

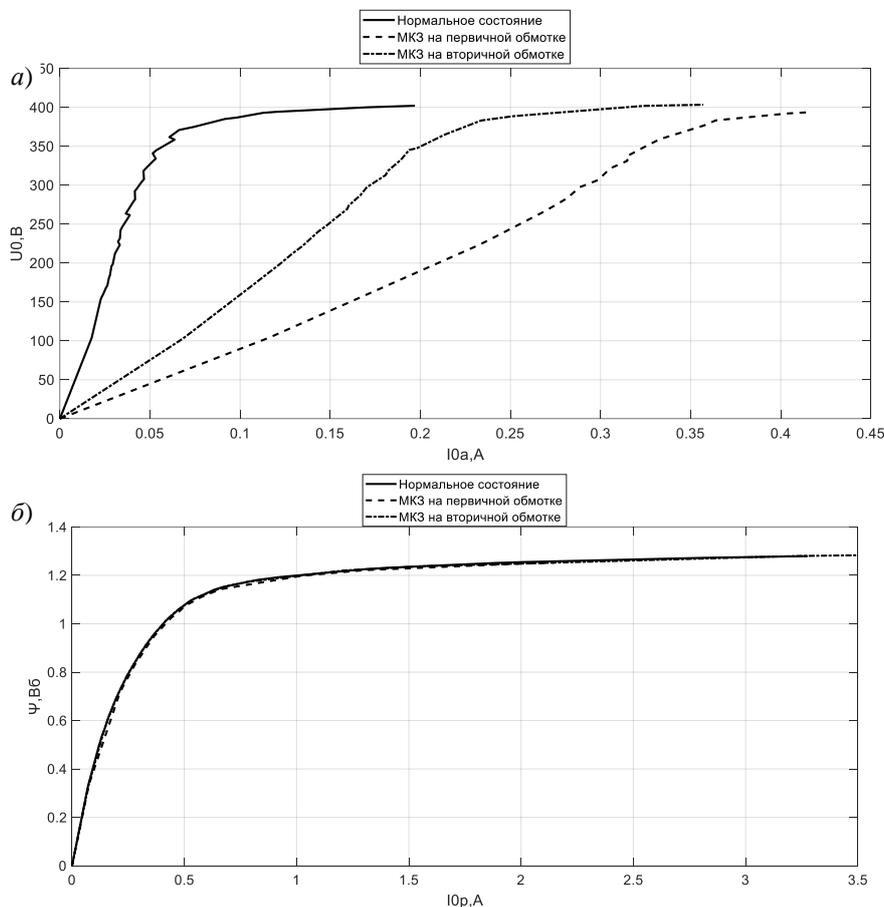


Рисунок 3 – Нелинейные параметры схемы замещения:
а – вольт-амперная характеристика; б – кривая намагничивания

Во время проведения опыта холостого хода при отсутствии неисправностей и для МКЗ на различных обмотках были получены результаты, представленные

в таблице 1. Для определения параметров рассеивания в обмотках был проведен опыт короткого замыкания с использованием RLC-метра (таблица 2).

Таблица 1 – Результаты опытов холостого хода

Состояние	Измерено					Вычислено
	при $U_1 = U_{1н}$					
	$U_1, В$	$U_{20}, В$	$P_0, Вт$	$I_0, А$	$\cos\varphi_0$	
Нормальное	220,0	145,7	7,4	0,28	0,12	1,509
С МКЗ на первичной обмотке	219,9	146,0	43,0	0,34	0,57	1,506
С МКЗ на вторичной обмотке	219,9	144,9	23,3	0,30	0,40	1,519

Таблица 2 – Результаты опытов короткого замыкания

Состояние	Измерено		Вычислено			
	$r_{кз}, Ом$	$L_{кз}, мГн$	$r_1, Ом$	$L_1, мГн$	$r_2, Ом$	$L_2, мГн$
Нормальное	9,61	5,838	4,805	2,919	2,107	1,28
С МКЗ на первичной обмотке	9,39	5,790	4,695	2,895	2,07	1,276
С МКЗ на вторичной обмотке	9,60	5,836	4,800	2,918	2,079	1,264

Как видно из таблицы 2, для небольшого количества короткозамкнутых витков сопротивление $r_{кз}$ и индуктивность $L_{кз}$ значительно не отличаются между

нормальным состоянием и межвитковыми короткими замыканиями.

Для верификации полученных параметров в таблице 2 также учитывались следующие закономерности (значимо влияющими исходными факторами являлись число витков обмоток, температура и длина провода).

Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора в общем виде

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

где w – количество витков в обмотке; l_{cp} – средняя длина витка обмотки; ρ_{20} – удельная электрическая проводимость; S – площадь поперечного сечения.

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

Индуктивное сопротивление обмоток трансформатора в общем виде

$$x = 1,58 f l_1 w^2 \lambda_1 \cdot 10^{-8},$$

где l_1 – длина сердечника; λ_1 – нелинейный коэффициент проводимости рассеяния поля.

На основании опытов холостого хода и короткого замыкания было выполнено моделирование трансформатора в нормальном состоянии и при МКЗ с помощью программы Simulink.

Полученные схемы замещения трансформатора и результаты моделирования в режиме холостого хода, представлены на рисунке 4.

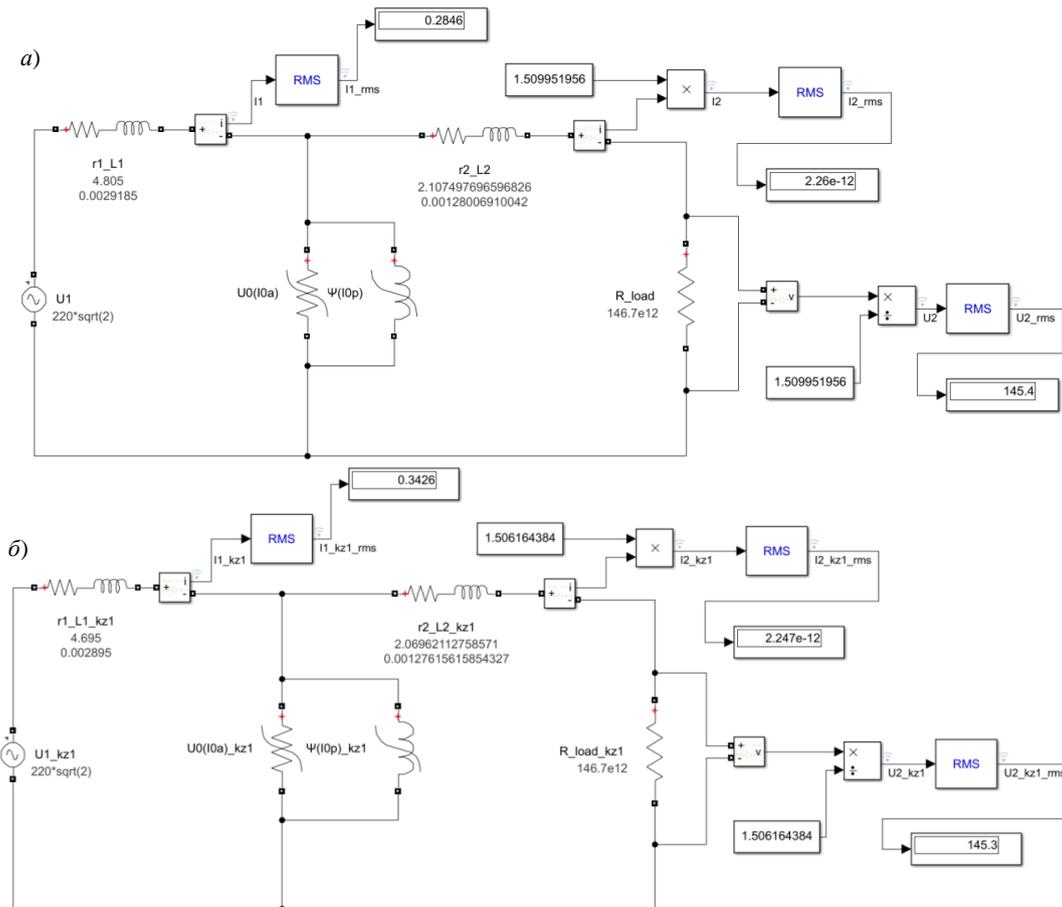


Рисунок 4 – Схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода: а – при нормальном состоянии; б – при МКЗ на первичной обмотке

Как видно из полученных результатов (см. рисунок 4), модель полностью согласуется с результатами экспериментов. Причем не только в области холостого хода и короткого замыкания, но и во всём спектре нагрузки между ними. Это дает основание для получения нужных результатов в дальнейшем с помощью данной модели, не прибегая к натурным экспериментам. Также на основании полученных схем замещения можно исследовать переходные процессы, возникающие в момент включения трансформатора, а также формы кривых различных напряжений и токов, в установившемся режиме работы и проводить частотные анализы.

Для приборного диагностирования МКЗ на основе вышеприведенных формул и схем замещения в программе Simulink можно использовать ток намагничи-

вания. На нем отчетливо видны значимые изменения от нормального режима холостого хода при МКЗ на различных обмотках (рисунок 5).

Как видно из рисунка 6, с помощью графиков установившихся процессов тока намагничивания в режиме холостого хода авторы обучили и дополнили возможности уже имеющегося диагностируемого комплекса неисправностей трансформаторов на основе сверточных нейронных сетей [6]. Полученные результаты исследования позволят расширить возможности комплекса в части диагностики испытываемых на наличие МКЗ трансформаторов с определением поврежденной обмотки и оценки количества поврежденных витков не только при непрерывных измерениях, но и при подключении в режиме холостого хода по заявкам предприятий.

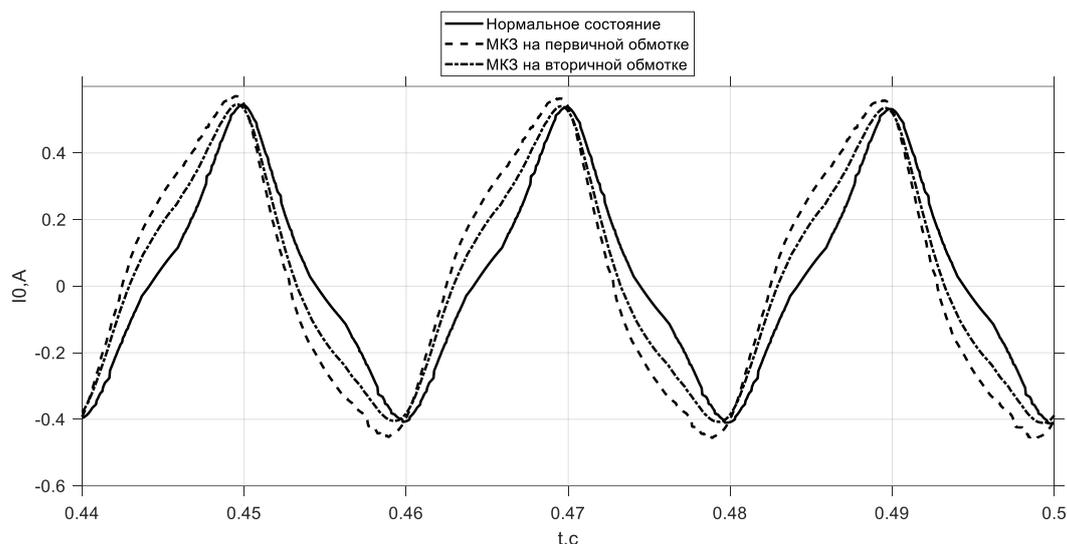


Рисунок 5 – Графики установившихся процессов тока намагничивания в режиме холостого хода

Таким образом рассмотренный математический инструмент 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 и проводить частотные анализы, возникающие в момент включения;
- унифицировать исследования для трансформаторов различных мощностей и легко адаптировать под различное исполнение.

Список литературы

1 ГОСТ 11677–85. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – Введ.1986-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 39 с.
 2 Попов, Г. В. Алгоритм комплексной диагностики масляных трансформаторов / Г. В. Попов, Ю. Ю. Рогожников // Электрические станции. – 2003. – № 8. – С. 54–59.

3 Комбинированные системы сбора передачи технологической и диагностической информации АСУ ТП электроустановок / А. Н. Васев [и др.] // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (11–12). – С. 16–26.

4 Кубарев, А. Ю. Методы исследования свойств дефектного электрооборудования / А. Ю. Кубарев, А. Б. Акпрова, Ю. Е. Кубарев // Проблемы энергетики. – 2018. – № 20 (3–4). – С. 108–115.

5 Gaser, H. P. Condition Assessment of the Cellulosic Insulation from Power Transformers Taken out of Service / H. P. Gaser, B. Heirtich, C. Krause // Proc. of the Inter. Symp. on High Voltage Engineering. – Beijing (China), 25–29 August 2005. – P. 1–5.

6 Громыко, И. Л. Диагностический комплекс трансформаторов и его применение с помощью сверточных нейронных сетей / И. Л. Громыко, В. О. Белькин, В. Н. Галушко // Вестник БелГУТа: Наука и транспорт. – 2022. – № 2 (45). – С. 92–96.

7 Omicron / Диагностические испытания и мониторинг силовых трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.omicronenergy.com> – Дата доступа : 18.01.2023.

8 Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники : учеб. для вузов. В 3 т. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.

Получено 18.03.2024

I. L. Hramyka, V. A. Patskevich. Modeling of electromagnetic processes in a single-phase transformer with interturn short circuits based on a t-shaped exchange circuit

Technology for determining interturn faults, based on the experimental determination of the parameters of the equivalent circuit of single-phase transformers for interturn short circuit is described. The developed mathematical tools based on an equivalent circuit for interturn short circuits will make it possible to obtain samples using a model method for training convolutional neural networks, to unify research for transformers of various powers and to easily adapt them to different designs. The created mathematical model based on an equivalent circuit for interturn closures makes it possible to obtain samples using a model method for training convolutional neural networks.