© Р.Г. Мустафин, Ю.В. Писковацкий, Ф.Р. Сиразутдинов, Д.Ф. Губаев, А.Н. Гавриленко

УДК 621.317.1 DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ ТРЁХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Р.Г. Мустафин, Ю.В. Писковацкий, Ф.Р. Сиразутдинов, Д.Ф. Губаев, А.Н. Гавриленко

Казанский государственный энергетический университет,
г. Казань, Россия
ramil.mustafin@gmail.com

Резюме: *ЦЕЛЬ. Выявить закономерности влияния витковых замыканий на параметры трёхфазного трансформатора сети в режиме отключенного трансформатора с подачей контрольных напряжений и токов от постороннего источника, в линейном режиме работы трансформатора. МЕТОДЫ. Для достижения цели проводились экспериментальные исследования на силовом трансформаторе Trihal напряжением 20/0,4 кВ с искусственно созданным витковым замыканием, выполнялось математическое моделирование и расчеты параметров магнитной системы трехфазного трансформатора. РЕЗУЛЬТАТЫ. Были выполнены экспериментальные измерения напряжения холостого хода на стороне высокого напряжения силового трансформатора с подачей трехфазного напряжения прямой последовательности на сторону низкого напряжения трансформатора. Аналогичные измерения проведены с приложением трехфазного тока нулевой последовательности. Исследовано влияние виткового замыкания на магнитную систему трехфазного трансформатора с приложением напряжений и токов нулевой и прямой последовательностей. Разработана математическая модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, позволяющая определить изменение параметров обмоток трансформатора и установить взаимосвязь между первичными и вторичными напряжениями и токами в условиях возникновения виткового замыкания. Параметры магнитной системы трехфазного трансформатора были вычислены по результатам экспериментальных измерений. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложен эффективный метод обнаружения витковых замыканий по измерениям с подачей токов нулевой последовательности. Разработана упрощенная модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, которая позволяет качественно оценить изменение его параметров при возникновении виткового замыкания. Предложена модель виткового замыкания, которая может использоваться для изучения влияния витковых замыканий на магнитную систему трансформатора.*

Ключевые слова: *силовые трансформаторы, витковые замыкания, старение изоляции, моделирование.*

Для цитирования: Мустафин Р.Г., Писковацкий Ю.В., Сиразутдинов Ф.Р., Губаев Д.Ф., Гавриленко А.Н. Разработка метода определения витковых замыканий в обмотке трёхфазного трансформатора // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 46-58. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58.

DEVELOPMENT OF A TURN-TO-TURN FAULT DETECTION METHOD IN THE THREE-PHASE TRANSFORMER'S WINDING

RG. Mustafin, YuV. Piskovatsky, FR. Sirazutdinov, DF. Gubaev, AN. Gavrilenko

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
ramil.mustafin@gmail.com

Abstract: *THE PURPOSE. Reveal the regularities of turn-to-turn faults influence on to parameters of a three-phase network transformer in the disconnected transformer mode with the supply of control voltages and currents from an external source in the transformer linear operation. METHODS. To achieve the purpose, experimental studies were carried out on the*

power transformer (Trihal with a voltage of 20 / 0.4 kV) with an artificially created turn-to-turn fault, mathematical modeling and calculations of the three-phase transformer magnetic system parameters. RESULTS. Experimental measurements of the open circuit voltage were performed on the power transformer high voltage side by applying a three-phase positive sequence voltage to the transformer low voltage side. Similar measurements were carried out using a three-phase zero sequence current. The influence of the turn-to-turn fault on the magnetic system of the three-phase transformer with the application of voltages and currents of zero and direct sequences is investigated. A mathematical model of three-phase transformer magnetic system has been developed, which makes it possible to determine the change in the parameters of the transformer windings and to establish the relationship between the primary and secondary voltages and currents in conditions of the occurrence of a turn-to-turn fault. The parameters of the three-phase transformer magnetic system were calculated from the results of experimental measurements. CONCLUSION. An effective method for detecting turn-to-turn faults by measurements with the supply of zero sequence currents is proposed. A simplified model of the three-phase transformer magnetic system has been developed. This model allows us to qualitatively evaluate the changes in the transformer parameters when a turn-to-turn fault occurs. A model of turn-to-turn fault is proposed, which can be used to study the effect of turn-to-turn fault on the transformer magnetic system.

Key words: *power transformers, turn-to-turn faults, insulation aging, modeling.*

For citation: Mustafin RG, Piskovatsky YuV, Sirazutdinov FR, Gubaev DF, Gavrilenko AN. Development of a turn-to-turn fault detection method in the three-phase transformer's winding *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):46-58. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-46-58.

Введение и литературный обзор

Витковые замыкания являются одной из основных причин повреждения силовых трансформаторов высокого и среднего класса напряжения [1, 2]. Как правило, именно с виткового замыкания начинаются межслойные и межкатушечные замыкания в обмотках. Стандартные методы определения витковых замыканий не обладают достаточной чувствительностью, поэтому не дают полной количественной оценки замкнувшихся витков [3-5], в некоторых случаях не определяют наличие виткового замыкания [6, 7]. Поэтому актуальной задачей является разработка новых чувствительных методов, позволяющих определять наличие витковых замыканий.

В основном витковые замыкания в обмотках трансформатора возникают в результате старения изоляции или при протекании токов внешних коротких замыканий (КЗ) по причине недостаточной электродинамической стойкости обмоток [8, 9]. Также витковое замыкание может произойти по причине производственного дефекта или при несоблюдении требований инструкции по технической эксплуатации трансформаторов [10].

Для проверки чувствительности новых методов к данному виду повреждений была разработана математическая модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, позволяющая определять взаимосвязь первичных, вторичных токов и напряжений в обмотках трансформатора при возникновении виткового замыкания. Для верификации модели была произведена серия экспериментальных измерений параметров трансформатора в условиях моделирования виткового замыкания. Измерения выполнялись на силовом трансформаторе *Trihal* мощностью 160 кВА, напряжением 20/0,4 кВ производства компании *Shneider Electric*, параметры трансформатора представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры трансформатора *Trihal*

Параметр	Значение
Мощность, кВА	160
Номинальное напряжение, кВ	20/0,4
Длина стержня, м	1,03
Длина ярма, м	0,85
Потери холостого хода, Вт	610
Напряжение КЗ, %	6

Особенностям моделирования внутренних повреждений трансформаторов были посвящены работы отечественных и зарубежных специалистов, достаточно подробный обзор представлен в работах [11, 12]. Большое число работ посвящено моделированию витковых замыканий [13], в том числе в программных комплексах, например, *Mathlab/Simulink* [14] или *ATP-EMPT* [15].

Магнитные потоки в трехфазном трансформаторе

Неизменность магнитного потока при переходе от режима холостого хода к режиму нагрузки является важнейшим свойством трансформатора. Из этого свойства следует закон равновесия магнитодвижущих сил (МДС) в трансформаторе: $F_1+F_2=F_0$, где F_1 и F_2 - МДС создаваемая первичной и вторичной обмотками при нагрузке, F_0 - МДС, создаваемая первичной обмоткой при холостом ходе. Нагрузочная составляющая тока первичной обмотки (первичный ток за вычетом тока холостого хода) не только уравновешивает МДС вторичной обмотки, но и обеспечивает поступление в трансформатор из сети мощности, отдаваемой приемнику электрической энергии, подключенному к вторичной обмотке.

В реальном трансформаторе помимо основного магнитного потока Ф, замыкающегося по стали и сцепленного со всеми обмотками трансформатора, имеются также потоки рассеяния $\Phi\sigma_1$ и $\Phi\sigma_2$ (Рис. 1), сцепленные только с одной из обмоток.

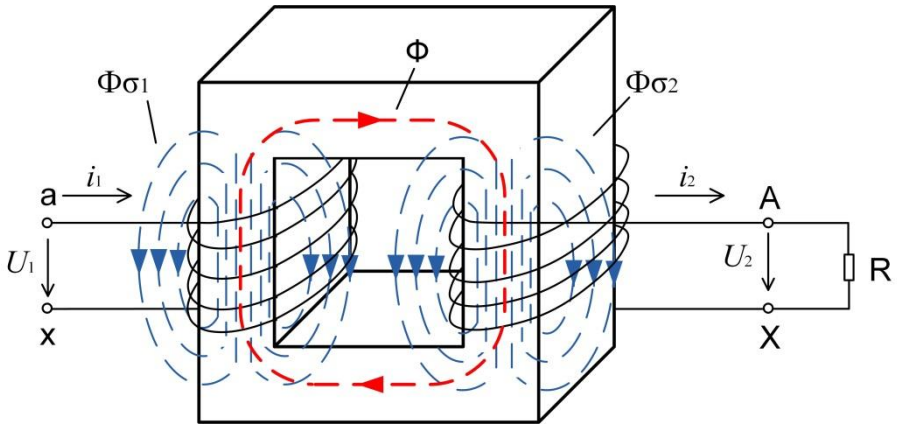


Рис. 1. Магнитные потоки в однофазном трансформаторе. i_1, U_1 – ток и напряжение первичной обмотки, i_2, U_2 – ток и напряжение вторичной обмотки, Ф – основной магнитный поток, $\Phi\sigma_1$ и $\Phi\sigma_2$ – потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток

Fig.1. Magnetic fluxes in a single-phase transformer. i_1, U_1- primary winding current and voltage, i_2, U_2 - secondary winding current and voltage,F- main magnetic flux, F σ_1 and F σ_2- scattering fluxes of the primary and secondary windings

Рассмотрим магнитные потоки в трёхфазном трансформаторе. Протекающий по первичной обмотке трансформатора ток I создает магнитное поле, а также суммарный магнитный поток Ф. Малая часть магнитного потока Ф замыкается по воздуху Фss, не затрагивая магнитопровод. Большая часть магнитных линий замкнется по магнитопроводу, образуя основной магнитный поток Фо. Некоторая часть магнитных линий, проходя по магнитопроводу, замкнется по воздуху, образуя поток рассеяния Фs.

Трехфазный трансформатор имеет шесть обмоток (рис. 2): на каждом фазном сердечнике расположены обмотка первичная (1), и обмотка вторичная (2). Рассмотрим магнитную связь первичной и вторичной обмоток одной фазы трансформатора, например фазы A. Полный магнитный поток первичной обмотки Φ_A частично замкнется по воздуху, образуя магнитный поток рассеяния Φ_{SSA} (3), который будет пересекать только сечение первичной обмотки фазы A. Большая часть магнитных линий замкнется по стальному магнитопроводу (4), образуя основной магнитный поток Φ_{OA} (5), при этом $\Phi_A = \Phi_{SSA} + \Phi_{OA}$.

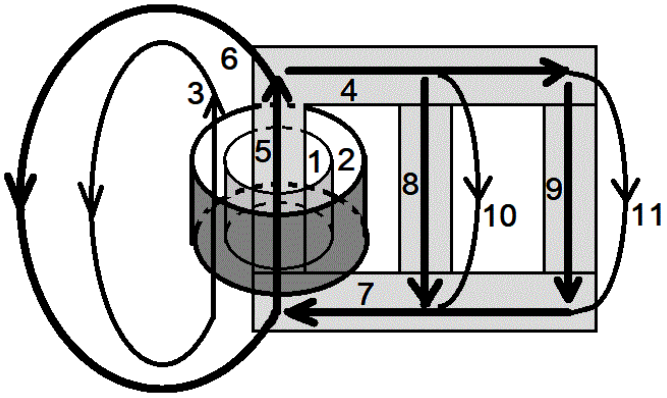


Рис. 2. Магнитная система трехфазного линейного трансформатора. 1- обмотка низкого напряжения фазы *A*, 2 - обмотка высокого напряжения фазы *A*, 3 – магнитный поток рассеяния Φ_{SSA} обмотки ВН фазы *A*, 4 – магнитопровод трансформатора, 5 – магнитный поток Φ_{OA} обмотки ВН фазы *A*, пересекающий магнитопровод, 6 – поток рассеяния Φ_{OSA}, 7 – замыкание по магнитопроводу магнитного потока Φ_{OA}, 8 – замыкание магнитного потока Φ_{OAB} по сердечнику фазы *B*, 9 – замыкание магнитного потока Φ_{OAC} по сердечнику фазы *C*, 10 – магнитный поток рассеяния Φ_{OSB} сердечника фазы *B*, 11 – магнитный поток рассеяния Φ_{OSC} сердечника фазы *C*

Fig.2. Magnetic system of three-phase linear transformer. 1- phase A low voltage winding,2- phase A high voltage winding,3- magnetic scattering flux F_{SSA} of the HV phase A winding,4- transformer magnetic core,5- magnetic flux F_{OA} of the HV phase A winding,6- scattering flow FS,7- short circuit of the magnetic flux of the F_{OA} along the magnetic circuit,8- closure of the magnetic flux of the F_{OAB} along the core of the phase B,9-closure of the magnetic flux of the F_{OAS} along the core of the phase C, 10- magnetic scattering flux F_{OSB} of the phase B core,11- magnetic scattering flux F_{OSC} of the phase C core

Рассмотрим магнитную связь обмоток разных фаз, расположенных на разных сердечниках магнитопровода. Основной магнитный поток Φ_{OA} будет замыкаться частично по воздуху, образуя поток рассеяния Φ_{OSA} (6), который не будет пересекать сечения обмоток фаз *B* и *C*. Большая часть магнитного потока Φ_{OA} замкнется по магнитопроводу (7), пересекая сечения обмоток фаз *B* – поток Φ_{OAB} (8) и *C* -поток Φ_{OAC} (9). При этом происходит намагничивание сердечников фаз *B* и *C*, и часть магнитных потоков Φ_{OAB} и Φ_{OAC} также будут замыкаться по воздуху, минуя обмотки фаз *B* и С, образуя магнитные потоки рассеяния Φ_{OSB} (10) и Φ_{OSC} (11) соответственно.

Модель трёхфазного трансформатора

При расчётах магнитных цепей используется почти полная формальная аналогия с электрическими цепями. Магнитная цепь описывается правилами Кирхгофа для потоков Ф через её элементы сечением *S* и магнитных напряжений ΔF между её узлами. Каждая обмотка является источником магнитодвижущей силы (МДС), а поток через ветвь определяется магнитным напряжением на ней и её магнитным сопротивлением.

Таким образом, распределение магнитных потоков можно представить в виде электрической схемы, в которой магнитному потоку соответствует электрический ток, магнитным сопротивлениям соответствуют активные сопротивления. МДС, которая создает магнитный поток, может быть представлена в модели в виде ЭДС: $МДС_A=I_A*W_A$, где I_A – ток катушки, W_A – количество витков катушки.

Модель магнитной системы трёхфазного трансформатора представлена на рис. 3, в которой резистор *R*1 соответствует магнитному потоку рассеяния обмотки ВН фазы *A*, резисторы *R*3, *R*10, *R*11 соответствуют магнитным потокам рассеяния обмоток фаз *A*, *B* и *C*, пересекающим магнитопровод, а резисторы *R*2, *R*8, *R*9 соответствуют магнитному сопротивлению стержней магнитопровода фаз *A*, *B*, *C* соответственно. Резисторы *R*4, *R*5, *R*6, *R*7 - соответствуют магнитному сопротивлению соответствующих участков ярма магнитопровода.

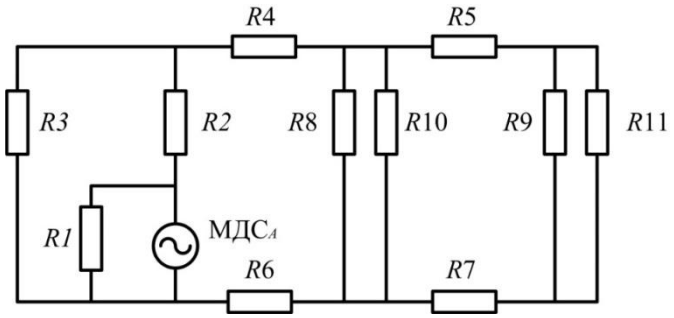


Рис. 3. Моделирование магнитной системы трансформатора, где МДС$_A$ - магнитодвижущая сила первичной катушки фазы *A*, *R*1 – сопротивление, моделирующее магнитный поток рассеяния обмотки ВН фазы *A*; *R*2, *R*8, *R*9 – магнитные сопротивления стержней магнитопровода фаз *A*, *B*, *C* соответственно; *R*3, *R*10, *R*11 – сопротивления, соответствующие магнитным потокам рассеяния обмоток фаз *A*, *B* и *C*, пересекающим магнитопровод; *R*4, *R*5, *R*6, *R*7 - магнитные сопротивления ярма магнитопровода

Fig.3. Simulation of the magnetic system of a transformer, where MDA is the magnetomotive force of the primary coil of phase A, R1 is the resistance simulating the magnetic flux of scattering of the HV winding of phase A; R2, R8, R9 are the magnetic resistances of the magnetic core rods of phases A, B, C, respectively; R3, R10, R11 are the resistances corresponding to the magnetic flux of scattering of the windings of phases A, B, and C crossing the magnetic core; R4, R5, R6, R7 are the magnetic resistances of the magnetic yoke of the magnetic core

В данной модели сопротивления *R*3, *R*10, *R*11 являются магнитными сопротивлениями рассеяния обмоток фаз *A*, *B* и *C*. Учитывая, что магнитный поток рассеяния является распределенным в пространстве, введём в представленную выше модель сопротивления рассеяния, привязанные к центрам двух участков ярма магнитопровода. Предлагаемая модель позволяет учесть распределенную геометрию трёхстержневого трансформатора и уменьшить количество переменных в модели. Введённые сопротивления рассеяния *R*12 и *R*13 (рис. 4) будут иметь одинаковые значения, а также ввиду большого значения не будем учитывать сопротивления рассеяния, не связанные с магнитопроводом *R*1 (рис. 3). Сопротивления участков ярма магнитопровода, от центрального стержня до боковых стержней, представлены в виде двух одинаковых сопротивлений, равных половине сопротивления ярма *R*4/2, *R*5/2, *R*6/2, *R*7/2 (рис. 4). Таким образом, в модели остаются три независимых сопротивления: 1) одинаковые по величине сопротивления стержней магнитопровода *R*2, *R*8, *R*9; 2) одинаковые по величине сопротивления участков ярма магнитопровода *R*4, *R*5, *R*6, *R*7; 3) одинаковые по величине сопротивления рассеяния *R*12 и *R*13.

Предлагаемая выше модель магнитной системы трансформатора была реализована в программе *ElectronicsWorkbench*.

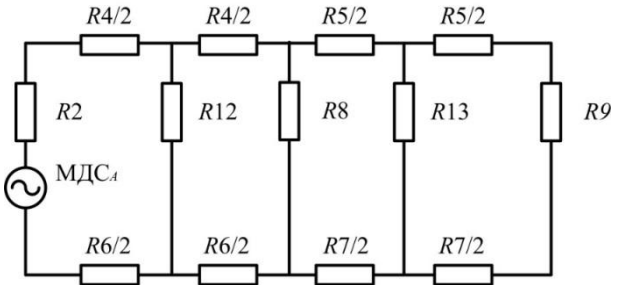


Рис. 4. Модель магнитной системы трансформатора, где МДС$_A$ - магнитодвижущая сила первичной катушки фазы *A*; *R*2, *R*8, *R*9 – магнитные сопротивления стержней магнитопровода фаз *A*, *B*, *C* соответственно; *R*4, *R*5, *R*6, *R*7 - магнитные сопротивления ярма магнитопровода; *R*12, *R*13 – одинаковые по величине сопротивления рассеяния

Fig.4. Model of the magnetic transformer system, where is the MDS$_A$- magnetomotive force of the primary coil of phase A;R2, R8, R9- magnetic resistances of magnetic core rods phase A, B, C respectively; R4, R5, R6, R7- magnetic resistances of magnetic core yoke; ; *R12, R13- the same amount of scattering resistance*

Материалы и методы

Рассмотрим связь компьютерной модели с результатами экспериментов на реальном трансформаторе.

Входной величиной для компьютерной модели являлись измеренные в эксперименте амплитуды и фазы токов в обмотках НН. Величины ЭДС (в вольтах) в модели, которые соответствуют МДС катушек реального трансформатора, брались численно равными соответствующим токам *I* фазных катушек НН (в миллиамперах): ЭДС [В] => *I* [мА]. При моделировании виткового замыкания учитывались соотношения количества витков обмоток трансформатора и количество витков в искусственно созданном в эксперименте витковом замыкании на одном из стержней трансформатора (во всех экспериментах витковое замыкание моделировалось одним витком). Реальное МДС (в ампер-витках) можно подсчитать путём умножения тока фазной обмотки НН (в амперах) на количество витков в обмотке НН (в нашем случае 41 виток). При этом соотношение ЭДС в модели и реального МДС равно: ЭДС [В] / МДС [ампер-виток] = 1000/41 = 24,4.

Выходной величиной модели являются токи в ветвях, которым соответствуют магнитные потоки в стержнях реального трансформатора. В эксперименте измерялись ЭДС холостого хода в обмотках ВН, которые пропорциональны магнитным потокам в стержнях. Реальный магнитный поток в стержне Ф [Вб] можно подсчитать, разделив ЭДС [В] холостого хода обмотки ВН на угловую частоту и число витков (в нашем случае 3690 витков). Соотношение тока в ветвях модели *I* [А] к соответствующему магнитному потоку Ф [Вб] в стержнях трансформатора подсчитаем из эксперимента А (табл.2). Так в эксперименте ЭДС ВН фазы *A* равно 403,2 В, при этом ток ветви А в модели (рис.5) равен 43,64 мА. Из этих величин подчитаем соотношение: *I* [А] / Ф [Вб] = 125.

Связь параметров компьютерной модели с геометрическими размерами трансформатора, используемого в эксперименте. Принимая, что сечение ярма и стержней магнитопровода одинаково, а магнитное сопротивление пропорционально длине магнитного пути данного участка магнитопровода, можно выразить сопротивление ярма через сопротивление стержней магнитопровода. Длина магнитного пути ярма трансформатора *Trihal* равна *Lя* = 0,85 м, длина магнитного пути стержней *Lс* = 1,03 м. В модели на рис.4 ярмо моделируется одинаковыми сопротивлениями (*R*4, *R*5, *R*6, *R*7), стержням соответствуют одинаковые сопротивления (*R*2, *R*8, *R*9). Соответственно в модели, которую будем использовать для описания результатов измерений на трансформаторе *Trihal*, примем отношения сопротивлений ярма к величинам сопротивлений стержней равное: (*R*4/2)/*R*2 = (0,85/4)/1,03 = 0,206.

Размерности физических величин магнитных сопротивлений трансформатора и размерности соответствующих сопротивлений (*R*4, *R*5, *R*6, *R*7) и (*R*2, *R*8, *R*9) модели разные, поэтому сопротивления модели мы можем взять произвольно, сохраняя только соотношения типа (*R*4/2)/*R*2. Величины магнитного сопротивления стержней примем как *R*2=*R*8=*R*9=1кОм, соответственно сопротивления *R*4/2=*R*5/2=*R*6/2=*R*7/2=0,206 кОм. Данные величины использовались для моделирования всех экспериментальных результатов, что дает возможность сравнивать выходные величины модели для различных экспериментов.

Абсолютные значения сопротивлений рассеяния *R*12, *R*13 в модели на рис. 4 играют разную роль в двух типах экспериментов: эксперименты с подачей прямой последовательности тока или напряжения на обмотки трансформатора; эксперименты с подачей нулевой последовательности тока или напряжения на обмотки трансформатора. В первом случае сопротивления рассеяния не играют существенной роли, поэтому для описания данных экспериментов примем значение сопротивлений *R*12, *R*13 на порядок большим, чем сопротивления стержней: *R*12=*R*13=10**R*2=10 кОм. Во втором случае, в экспериментах с подачей нулевой последовательности тока, сопротивления рассеяния играют определяющую роль в формировании магнитных потоков, и это даёт возможность экспериментально определить соотношение сопротивлений стержней и сопротивлений рассеяния *R*2/*R*12.

Сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования в упрощенной модели (рис.4) производилось как сравнение соотношений токов в ветвях модели (которые моделируют магнитные потоки в реальном трансформаторе), к соответствующим соотношениям измеренных в эксперименте ЭДС во вторичных обмотках ВН, которые пропорциональны магнитным потокам в стержнях реального трансформатора. При этом сравнивались соотношения данных в различных фазах (*A*, *B* или *C*) в одном эксперименте, так и соотношения данных одноименных фаз в различных экспериментах.

Были проведены лабораторные экспериментальные исследования на трансформаторе *Trihal*. В качестве трёхфазного источника тока использовался программно-технический

комплекс РЕТОМ-51, для измерения фазных токов и напряжений в обмотках трансформатора использовался цифровой вольтамперфазометр «Ретометр».

Результаты и обсуждение

А. Трансформатор на холостом ходу без виткового замыкания, на обмотку НН подано напряжение прямой последовательности.

От устройства РЕТОМ-51 подано напряжение прямой последовательности равное 4,5 В на обмотку НН трансформатора, соединение обмоток со стороны НН звезда, на стороне ВН обмотки между собой не соединены. С помощью вольтамперфазометра произведены измерения напряжения на стороне НН и ВН трансформатора, а также ток на стороне НН. Результаты измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений без виткового замыкания

Параметр*	фаза *A*	фаза *B*	фаза *C*
Напряжение НН, В	$4{,}46\, e^{j4^\circ}$	$4{,}47\, e^{j120^\circ}$	$4{,}48\, e^{-j119^\circ}$
Ток НН, А	$0{,}070\, e^{-j49^\circ}$	$0{,}058\, e^{j66^\circ}$	$0{,}080\, e^{j173^\circ}$
Напряжение ВН, В	$403{,}2\, e^{-j1^\circ}$	$405{,}1\, e^{j119^\circ}$	$404{,}5\, e^{-j120^\circ}$

Упрощенная модель магнитной системы трансформатора представлена на рис. 5, реализованная в программе *Electronics Workbench*. В модели величины МДС фазных обмоток обозначены как: *MDSa* – фазы *A*, *MDSb* – фазы *B*, *MDSc* – фазы *C* и представлены в виде источника напряжения. В результате расчёта компьютерной модели получены следующие значения токов: для фазы *A* – 43,65мА, для фазы *B* – 44,61мА, для фазы и *C* – 45,36мА. Рассчитанные токи ветвей в модели близки друг к другу по абсолютной величине, как и измеренные напряжения обмотки ВН (которые используются в данном случае для измерения магнитных потоков в стержнях), что указывает на адекватность упрощенной модели магнитной системы трансформатора. Для контроля введем отношение: измеренное напряжение ВН (в вольтах) к токам соответствующих фаз компьютерной модели (в миллиамперах) $K=U_{вн}$[В]/I[мА], которое для измерений из таблицы 2 и компьютерной модели из Рис.5 равно *Ka*=403,2В/43,65мА=9,2; *Kb*=405,1В/44,61мА=9,1; *Kc*=404,5 В/45,36 мА=8,9. Видно, что данное соотношение одинаково для разных фаз, и для всех последующих измерений данное соотношение должно быть примерно таким же, как в данном эксперименте.

Токи НН имеют разные значения для разных фаз, что явно показывает несимметричность магнитной системы трехфазного трансформатора: центральный и боковые стержни явно находятся в разных условиях относительно магнитных потоков.

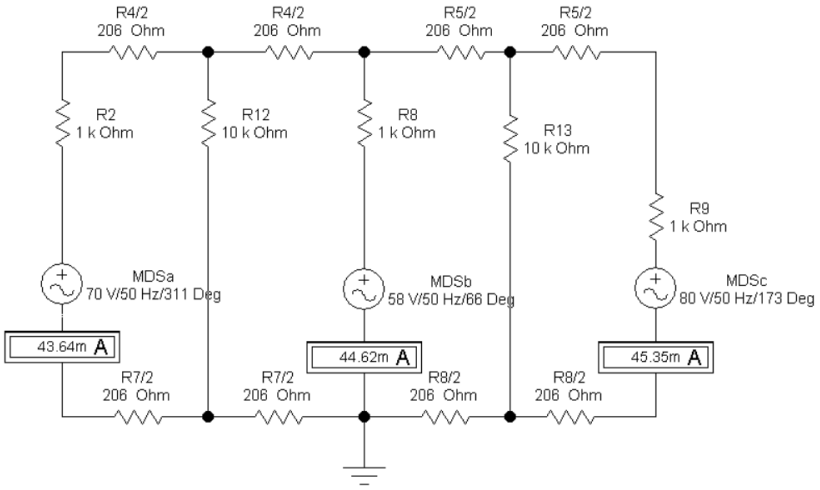


Рис. 5. Упрощенная модель магнитной системы трансформатора в программе *Electronics Workbench*, трансформатор на холостом ходу без виткового замыкания, на обмотку НН подано напряжение прямой последовательности

Fig.5. Simplified model of the magnetic system of the transformer in the Electronics Workbench program, the transformer is idling without a turn circuit, a direct sequence voltage is applied to the HH winding

* В таблицах фазы напряжений и токов указаны по отношению к напряжению, поданному на фазу *A*

Б. Трансформатор на холостом ходу, на обмотку НН подано напряжение прямой последовательности, витковое замыкание на фазе А

Физически витковое замыкание моделировалось путём накладывания короткозамкнутого витка медного провода сечением 5 мм^2, длиной 130 см. Виток охватывал стержень сердечника фазы А и замыкался через механический выключатель, что позволило оперативно включать и отключать витковое замыкание во время измерений. На стороне ВН обмотки не соединены друг с другом. От РЕТОМ-51 подаем напряжение 4,5 В прямой последовательности на обмотку НН трансформатора. Результаты измерений токов и напряжений сведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений с витковым замыканием на фазе *A*

Параметр	фаза *A*	фаза *B*	фаза *C*
Ток витка, А	$17{,}06\ e^{j174^\circ}$		
Ток НН, А	$0{,}375\ e^{-j8^\circ}$	$0{,}140\ e^{j136^\circ}$	$0{,}218\ e^{j171^\circ}$
Напряжение ВН, В	$381{,}5\ e^{j0^\circ}$	$399{,}3\ e^{j118^\circ}$	$404{,}3\ e^{-j119^\circ}$

Влияние виткового замыкания на ф. *A* моделируется добавлением МДС виткового замыкания *MDSf* (Рис.6), с учетом соотношения количества витков в витковом замыкании (1 виток) и количества витков в обмотке НН (41 виток): *MDSf* = (17,06/41)=0,416. Рассчитанные в модели токи ветвей по фазам *A* и *B* пропорциональны измеренным напряжениям обмотки ВН, соотношения *Ka* = 381,5 В / 46,01 мА = 8,3; *Kb* = 399,3 В / 47,66 мА = 8,4; *Kc* = 404,3 В / 62,54 мА = 6,5. Видно, что и при добавлении виткового замыкания, компьютерная модель достаточно адекватно описывает эксперимент.

Аналогичные физические и модельные эксперименты были проведены на фазах *B* и *C*. Результаты этих экспериментов схожи с результатом, полученным для фазы *A*. Таким образом, можно заключить, что предложенная упрощенная модель магнитной системы трансформатора достаточно хорошо описывает реальный эксперимент по выявлению влияния виткового замыкания на параметры трёхфазного трансформатора.

Были проведены измерения с подачей на трансформатор прямой последовательности тока. Имеется существенное отличие в поведении системы при подаче на трансформатор прямой последовательности напряжения или тока. При подаче напряжения, включение виткового замыкания почти не изменяет магнитные потоки, но увеличивает подаваемые токи. При подаче прямой последовательности тока, поскольку подаваемый ток фиксирован, не происходит компенсации влияния виткового замыкания. Включение виткового замыкания уменьшает магнитный поток в стержне с витковым замыканием (в эксперименте в 4 раза), за счет дополнительного магнитного сопротивления виткового замыкания. Сравнение результатов эксперимента и данных модели показали достаточно хорошее соответствие данных компьютерной модели соответствующим результатам эксперимента.

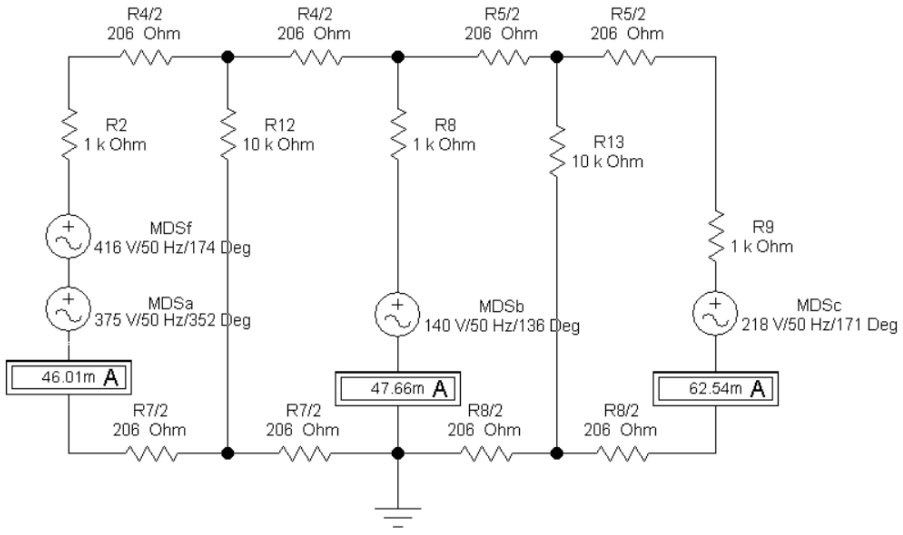


Рис. 6. Моделировании виткового замыкания на фазе *A*

Fig.6. Simulation of a loop closure in phase A

В. Трансформатор на холостом ходу, на обмотку НН подан ток нулевой последовательности.

Магнитное сопротивление рассеяния оказывает решающую роль при подаче нулевой последовательности на обмотки трехфазного линейного трансформатора, полностью обуславливая магнитные потоки в сердечнике. Поэтому данные эксперименты (совместно с экспериментами с подачей прямой последовательности) позволяют измерить соотношение магнитных сопротивлений стержней и магнитных сопротивлений рассеяния. При подаче на обмотки НН напряжения нулевой последовательности устройство РЕТОМ-51 отключается по короткому замыканию. Поэтому были проведены измерения с подачей на обмотки НН нулевой последовательности тока. В таком режиме все токи фаз равны 0,1 А, соответственно все МДС равны друг другу (Рис.7). Соотношения *Ka*=3,7В/0,369мА=10; *Kb*=3,2В/0,432мА=7,4; *Kc*=3,6 В/0,369мА=9,7, что близко к значениям в предыдущих измерениях.

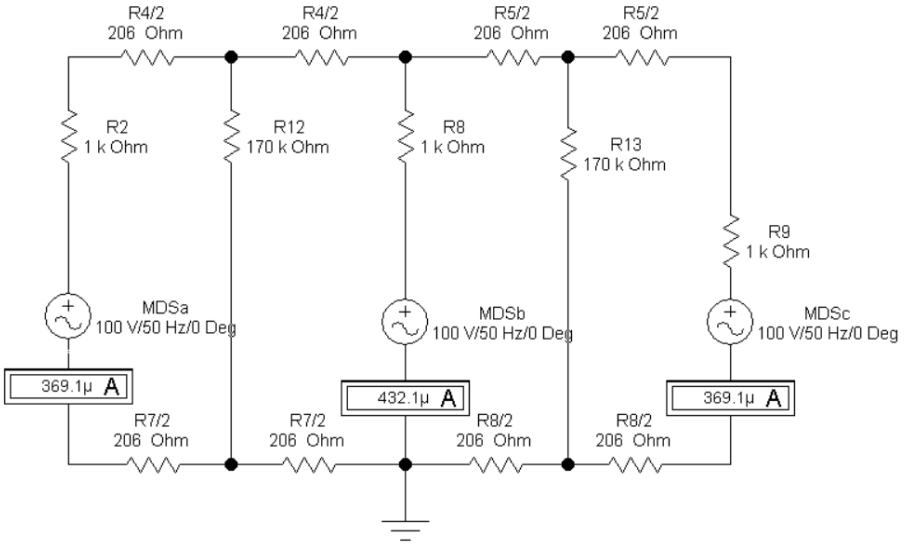


Рис. 7. Измерения с током нулевой последовательности
Fig.7. Zero-sequence current measurements

Результаты измерений сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты измерений без виткового замыкания

Параметр	фаза *A*	фаза *B*	фаза *C*
Напряжение ВН, В	$3{,}7\ e^{-j12^\circ}$	$3{,}2\ e^{-j13^\circ}$	$3{,}6\ e^{-j4^\circ}$
Напряжение НН, В	0,043	0,039	0,042

Вольтамперфазометр не позволяет измерять фазу для малых значений напряжений, поэтому в табл. 4 отсутствует фаза напряжения НН. Увеличение тока I_0 позволяет измерить и фазы (табл. 5).

Таблица 5

Результаты измерений без виткового замыкания

Параметр	фаза *A*	фаза *B*	фаза *C*
Напряжение НН, В; угол, градусы	$0{,}133\ e^{-j9^\circ}$	$0{,}114\ e^{-j5^\circ}$	$0{,}133\ e^{-j4^\circ}$
Ток НН, А; угол, градусы	$0{,}308\ e^{-j87^\circ}$	$0{,}305\ e^{-j85^\circ}$	$0{,}305\ e^{-j85^\circ}$
Напряжение ВН, В; угол, градусы	$10{,}9\ e^{-j8^\circ}$	$9{,}17\ e^{-j5^\circ}$	$11{,}05\ e^{-j4^\circ}$

Наблюдается весьма малое напряжение на фазах НН и ВН, что обусловлено большой величиной магнитного сопротивления рассеяния *R*12, *R*13, относительно магнитного сопротивления стержней *R*2, *R*8, *R*9.

Г. Трансформатор на холостом ходу, на обмотку НН подан ток нулевой последовательности, витковое замыкание на фазе В

От устройства РЕТОМ-51 подан ток нулевой последовательности равный 0,1 А на обмотки НН. При моделировании виткового замыкания на фазе *B*, получим следующие значения напряжений на обмотках ВН: $U_A = 3{,}25\ e^{-j7^\circ}$ В, $U_B = 0{,}19\ e^{j3^\circ}$ В, $U_C = 3{,}60\ e^{-j2^\circ}$ В. Соотношения *Ka* = 3,25В/0,603мА=5,4; *Kb* = 0,19 В/0,04 мА = 4,7; *Kc* = 3,6В/0,603мА = 5,9 близки для фаз *A*, *B* и

C, но отличаются от остальных экспериментов, что может быть связано с гистерезисом магнитной системы трансформатора в измерениях с малыми токами фаз.

В режиме тока нулевой последовательности магнитные потоки фаз уравновешивают друг друга, поэтому данный режим подобен дифференциальным методам измерения наличия витковых замыканий в трансформаторе. Включение виткового замыкания (на фазе *B*) нарушает баланс магнитных потоков, соответственно напряжение холостого хода ВН на фазе *B* с витковым замыканием падает на порядок (Рис.8).

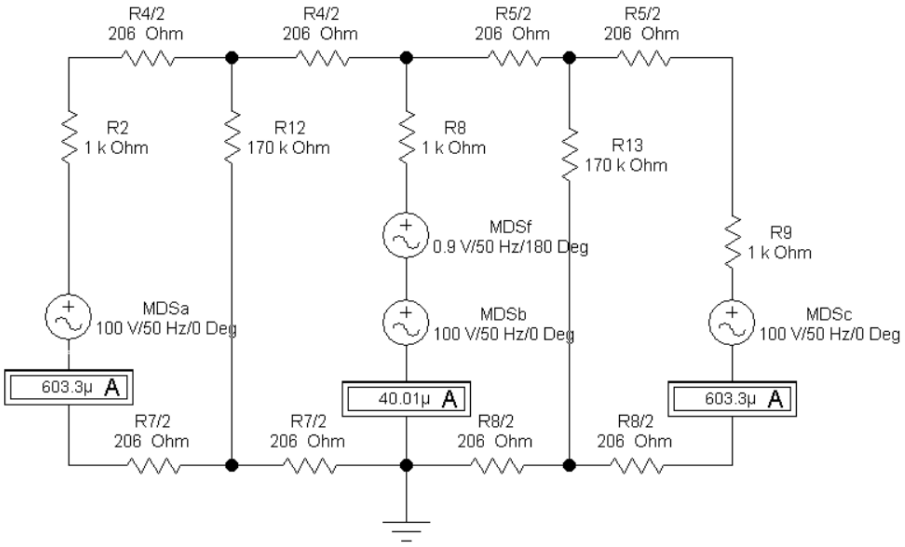


Рис. 8. Витковое замыкание на фазе В

Fig.8. Loop closure in phase B

Модель виткового замыкания

Использование источника напряжения для моделирования витковых замыканий накладывает определённые ограничения на применение вышеописанной модели, так как для того, чтобы задать значение напряжения *MDSf* – необходимо измерить значение тока в замкнувшихся витках. Поэтому необходимо разработать модель виткового замыкания, в программной среде *Electronics Workbench* данную модель можно представить в виде модуля. Обозначим этот модуль модели виткового замыкания как *Fault*.

Модель виткового замыкания представляет собой последовательно соединенное активное сопротивление с индуктивностью (рис. 9). Активное сопротивление короткозамкнутого медного витка, использовавшегося при проведении экспериментов, равно 5 мОм. Кроме сопротивления самого провода в цепи виткового замыкания включен выключатель, сопротивление контактов которого в модели приняли равным 20 мОм. Соответственно в модели (рис. 9) активное сопротивление виткового замыкания принимаем равным 25 мОм. Индуктивность виткового замыкания 72 мкГн является индуктивностью рассеяния.

Клеммы подключения модуля расположены слева, в цепи стоит преобразователь тока в напряжение. Далее в цепи стоит блок дифференцирования по времени *d/dt*, который моделирует наведение ЭДС в витковом замыкании от магнитного потока сердечника трансформатора, к которому подключена цепь из активного сопротивления и индуктивности. Далее ток в цепи обратно преобразуется в напряжение, которое моделирует МДС*f* во внешней цепи.

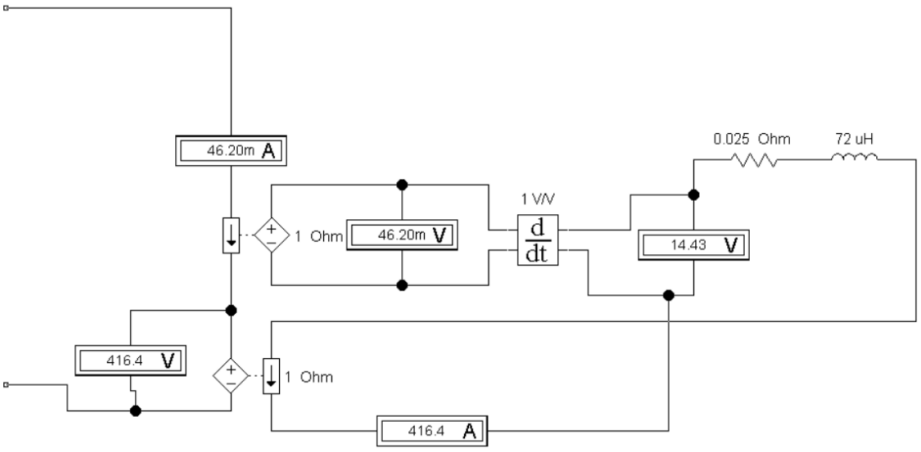


Рис. 9. Модель виткового замыкания *Fault*
Fig.9. Fault Loop Closure Model

В упрощенной модели магнитной системы трёхфазного трансформатора при моделировании виткового замыкания на фазе *A* (рис. 6) произведём замену МДС виткового замыкания *MDSf* на модуль *Fault* (рис. 10), при этом использует те же исходные значения МДС обмоток.

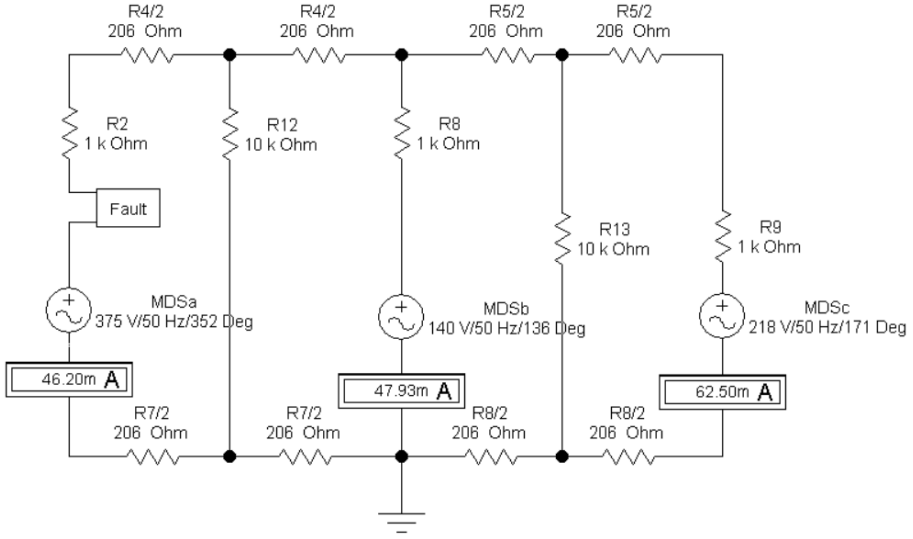


Рис. 10. Моделирование модулем *Fault* виткового замыкания на фазе *A*
Fig.10. Simulation of a phase A loop closure by the Fault module

Сравнивая значения токов в ветвях, представленных на рис. 6 и рис. 10 можно сделать вывод, что модель виткового замыкания *Fault* достаточно хорошо моделирует реальное витковое замыкание.

Заключение

1. Предложена модель магнитной системы трёхфазного трансформатора, которая позволяет качественно оценить изменение его параметров при возникновении виткового замыкания.

2. Предложена модель виткового замыкания, которая может использоваться для изучения влияния витковых замыканий на магнитную систему трансформатора.

3. Разработаны и показаны основы метода обнаружения витковых замыканий с использованием токов нулевой последовательности. Определено, что при подаче на обмотки трансформатора тока прямой последовательности, при подключении виткового замыкания, за счет дополнительного магнитного сопротивления виткового замыкания, магнитный поток в стержне с витковым замыканием уменьшается (в эксперименте в 4 раза). В то же время, при подаче на обмотки трансформатора тока нулевой последовательности, при подключении виткового замыкания значительно (на порядок в эксперименте) уменьшается магнитный поток в стержне с витковым замыканием. Таким образом, измерения с подачей нулевой и прямой последовательностей тока являются эффективными методами обнаружения витковых замыканий.

Литература

1. Львов М.Ю. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электричество. 2010. № 2. С. 27-31.

2. Рубцов А.В., Лукьянов М.М. Анализ отказов силовых трансформаторов распределительных сетей // Электробезопасность. 2014. № 1. С. 19-32.

3. Zacharias D., Gokaraju R. Prototype of a Negative-Sequence Turn-to-Turn FaultDetection Scheme for Transformers // IEEE Transactions on power delivery. 2016. V. 31. N 1. pp. 122-129.

4. Oliveira Luís M. R., Marques Cardoso A. J. Comparing Power Transformer Turn-to-Turn Faults Protection Methods: Negative Sequence Component Versus Space Vector Algorithms // IEEE Transactions on Industry Applications. 2017. V. 53. I. 3. pp. 2817-2825.

5. Новожилов А.Н., Горюнов В.Н., Новожилов Т.А. Защита однофазного трансформатора от витковых замыканий в обмотках на встроенных магнитных трансформаторах // Электротехника. 2018. №2. С. 59-63.

6. Климова Т.Г., Смирнов В.С. Моделирование витковых замыканий в обмотках силового трансформатора в программном комплексе Matlab/Simulink // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. №4(55). С. 98-105.

7. Атнишкин А. Б., Широкин М. Ю. Моделирование витковых замыканий в обмотках силового трансформатора // Труды VII международной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодёжи"; 19–23 сентября 2016 г., Казань. Казань: КГЭУ, 2016. Т 1. С. 293-294.

8. Бартли У. Обзор повреждений трансформаторов // Энергетика и менеджмент. 2011. № 1(58). С. 40-45.

9. Хренников А.Ю., Рубцов А.В., Передельский В.А., Сафонов А.А., Якимов В.А. О повреждениях обмоток силовых трансформаторов и диагностике их геометрии методом низковольтных импульсов // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2004. № 5. С. 13-18.

10. Атнишкин А.Б. Адаптивные модификации алгоритма дифференциальной защиты трансформатора. Дис. … канд. техн. наук. Чебоксары; 2019.

11. Martinez J.A., Mork B. A. Transformer modeling for low and mid-frequency transients – a review // IEEE Trans. Power Del. 2005. V. 20, N 2. pp. 1625-1632.

12. Кружаев А.В., Елагин И.А., Павлейно М.А. и др. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование переходных процессов в однофазном трансформаторе напряжения // Журнал технической физики. 2015. №2. С. 31-38.

13. Mejia-Barron A., Valtierra-Rodriguez M., Granados-Lieberman D. at al. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents // Measurement. 2018. V. 117. pp. 371-379.

14. Ramesh K., Sushama M. Inter-turn fault detection in power transformer using wavelets // International journal of emerging trends in electrical and electronics. 2014. V. 10, I. 10.

15. Guillen D., Olivares-Galvan J.C., Escarela-Perez R. at al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // Measurement. 2019. V. 141. pp. 24-36.

Авторы публикации

Мустафин Рамиль Гамилович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Писковацкий Юрий Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Сиразутдинов **Фарит Рамилевич** – аспирант, ассистент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Губаев **Дамир Фатыхович** – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

Гавриленко Андрей Николаевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Lvov MYu. Analiz povrezhdayemosti silovykh transformatorov napryazheniyem 110 kV i vyshe. *Elektrichestvo.* 2010; 2:27-31.

2. Rubtsov AV, Lukyanov MM. Analysis of failure of power distribution transformers. *Elektrobezopasnost.* 2014;1:19-32.

3. Zacharias D, Gokaraju R. Prototype of a Negative-Sequence Turn-to-Turn Fault Detection Scheme for Transformers. *IEEE Transactions on power delivery*. 2016;31(1):122-9. doi: 10.1109/TPWRD.2015.2483524.

4. Oliveira Luís MR, Marques Cardoso AJ. Comparing Power Transformer Turn-to-Turn Faults Protection Methods: Negative Sequence Component Versus Space Vector Algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2017;53(3):2817-25. doi: 10.1109/TIA.2016.2613506.

5. Novozhilov AN, Goryunov VN, Novozhilov TA. Protection of a single-phase transformer from interwinding failure in windings of integral magnetic transformers. *Russian Electrical Engineering.* 2018;89(2):118-121. doi: 10.3103/S1068371218020128.

6. Klimova TG, Smirnov VS. Turn fault modelling in the windings of a power transformer in the Matlab/ Simulink software package. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredeleniye.* 2019; 55(4):98-105.

7. Aleksandr Atnishkin, Maksim Shirokin. Turn-to-turn faults modelling in the windings of power transformer. Trudy 7 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Elektroenergetika glazami molodozhi»;19–23 sentyabrya 2016 g., Kazan'. Kazan': KGEU, 2016;1:293-294.

8. Bartli U. Obzor povrezhdeniy transformatorov. *Energetika i menedzhment.* 2011; 58(1):40-45.

9. Khrennikov AYU, Rubtsov AV, Peredel'skiy VA, et al. O povrezhdeniyakh obmotok silovykh transformatorov i diagnostike ikh geometrii metodom nizkovol'tnykh impul'sov. *Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'*. 2004;5:13-18.

10. Atnishkin A.B. *Adaptivnyye modifikatsii algoritma differentsial'noy zashchity transformatora. Dis. kand. tekhn. nauk.* Cheboksary;2019.

11. Martinez JA, Mork BA. Transformer modeling for low and mid-frequency transients – a review. *IEEE Trans. Power Del*. 2005;20(2):1625-32. doi: 10.1109/TPWRD.2004.833884.

12. Kruzhayev AV, Yelagin IA, Pavleyno MA, et al. Komp'yuternoye modelirovaniye i eksperimental'noye issledovaniye perekhodnykh protsessov v odnofaznom transformatore napryazheniya. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki.* 2015;2:31-38.

13. Mejia-Barron A, Valtierra-Rodriguez M, Granados-Lieberman D. at al. The application of EMD-based methods for diagnosis of winding faults in a transformer using transient and steady state currents. *Measurement.* 2018;117:371-9. doi: 10.1016/j.measurement.2017.12.003.

14. Ramesh K, Sushama M. Inter-turn fault detection in power transformer using wavelets. *International journal of emerging trends in electrical and electronics*. 2014;10(10):1-5.

15. Guillen D, Olivares-Galvan JC, Escarela-Perez R, at al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization. *Measurement.* 2019;141:24-36. doi: 10.1016/j.measurement.2019.03.044.

Authors of the publication

Ramil' G. Mustafin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yuriy V. Piskovatskiy – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Farit R. Sirazutdinov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Damir F. Gubayev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Andrey N. Gavrilenko – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено ***13 января 2021г.***

Отредактировано ***05 февраля 2021г.***

Принято ***08 февраля 2021г.***