



ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ СПОСОБ ОБНАРУЖЕНИЯ ВИТКОВЫХ ЗАМЫКАНИЙ В ТРЕХФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Р.Г. Мустафин, Р.Ф. Ярыш

Казанский государственный энергетический университет

г. Казань, Россия

ramil.mustafin@gmail.com

Резюме: Измерены напряжения холостого хода, пропорциональные соответствующим магнитным потокам трехфазного трансформатора общего назначения с использованием дифференциальных методов, направленных на обнаружение витковых замыканий в обмотках трехстержневых трансформаторов.

Стандартный метод определения витковых замыканий основан на измерении тока холостого хода и измерении мощности потерь. В дополнение к ним для определения наличия витковых замыканий в трехфазных линейных трансформаторах предлагается применять дифференциальные методы, хорошо известные в релейной защите. Методы основаны на том, что витковое замыкание увеличивает магнитное сопротивление фазного стержня сердечника трансформатора, в фазной обмотке которого присутствует витковое замыкание. При подаче однофазного напряжения на обмотку фазы В в обмотках боковых фаз А и С линейного трехфазного трансформатора должны индуцироваться одинаковые по фазе и амплитуде напряжения. При соединении обмоток фазы А и С встречно, и измерении дифференциального сигнала разности напряжений фаз А и С происходит следующее. Если в исходном, неповрежденном состоянии, дифференциальный сигнал был близок к нулю, то витковое замыкание в одной из боковых фаз А или С вносит дисбаланс, и дифференциальный сигнал возрастает. Дифференциальный сигнал легко измерим на фоне близкого к нулю дифференциального сигнала в неповрежденном состоянии трансформатора, что обуславливает высокую чувствительность дифференциального метода к наличию витковых замыканий. При возникновении виткового замыкания на обмотке центральной фазы В необходимо учитывать дифференциальный сигнал в неповрежденном состоянии трансформатора.

Ключевые слова: магнитная система; дифференциальный метод; магнитный поток.

Для цитирования: Мустафин Р.Г., Ярыш Р.Ф. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. № 3. С.78-89. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-78-89.

THE DIFFERENTIAL METHOD OF DETECTING COIL CIRCUITS FAULTS IN THREE-PHASE TRANSFORMER

RG. Mustafin, RF. Yarish

Kazan State Power Engineering University

Kazan, Russia

ramil.mustafin@gmail.com

Abstract: Idle voltages proportional to corresponding magnetic flows of three-phase transformer of general purpose are measured using differential methods aimed at detection of inter turn fault in windings of three-leg transformers.

The standard method of determining the inter turn fault in the transformer windings is based on measuring idling current and measuring loss power. In addition, differential methods well known in relay protection are proposed to determine the presence of inter turn fault in three-phase linear transformers. The methods are based on the fact that the inter turn fault increases the magnetic resistance of the phase rod of the transformer core, in the phase winding of which there is a inter turn fault. When one-phase voltage is applied to the winding of phase B in the windings of side

phases A and C of the linear three-phase transformer, the same voltage phase and amplitude shall be induced. When phase A and C windings are connected in opposition and differential signal is measured, voltage difference of phases A and C is as follows. If, in the original, intact state, the differential signal was close to zero, the inter turn fault in one of the side phases A or C introduces an imbalance and the differential signal increases. The differential signal is easily measured against the background of the near zero differential signal in the intact state of the transformer, which causes a high sensitivity of the differential method to the presence of inter turn fault. In case of a inter turn fault on the winding of the central phase B, it is necessary to take into account the differential signal in the intact state of the transformer.

Key words: magnetic system, differential method, magnetic flux.

For citation: Mustafin RG, Yarish RF. The differential method of detecting coil circuits faults in three-phase transformer. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22 (3):78-89. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-78-89.

Введение

Витковое замыкание в обмотках трансформаторов является одним из распространенных видов повреждений. В ГОСТ¹ приведены два метода проверки измерением потерь холостого хода при малом напряжении:

- измерение потерь с приведением их к номинальному напряжению и сравнение распределения потерь с данными заводских испытаний.
- измерение потерь без приведения их к номинальному напряжению и сравнение распределения потерь по отдельным фазам трансформатора.

Измерение потерь холостого хода при малом напряжении производится на заводе для определения следующих дефектов в обмотках:

- металлических замыканий между соседними витками («витковое»);
- неодинаковое число витков в параллельно включенных цепях.

Перечень приемосдаточных испытаний в соответствии с ГОСТ², которым должен быть подвергнут каждый трансформатор:

- проверка коэффициента трансформации и группы соединения обмоток.
- испытание электрической прочности изоляции.
- проверка потерь и тока холостого хода.
- проверка потерь и напряжения короткого замыкания.
- измерение сопротивления обмоток постоянному току.
- измерение диэлектрических параметров изоляции.

Силовые трансформаторы в различных конструктивных исполнениях являются одним из важнейших и дорогих элементов энергосистемы [1]. Неожиданный отказ силового трансформатора может привести к значительным затратам на ремонт и финансовым потерям из-за внепланового отключения. На сегодняшний день задача построения защит от витковых замыканий в обмотках трансформатора и автотрансформатора для релейной защиты остается актуальной. Так в [2] исследуется применение метода локализации для распознавания витковых замыканий в автотрансформаторе. В результате виткового замыкания в обмотке возможен неожиданный отказ силового трансформатора, что может привести к значительным затратам на ремонт и финансовым потерям из-за внепланового отключения. Много работ посвящено моделированию витковых замыканий в различных программных комплексах, например *Matlab/Simulink* [3, 4, 5, 6, 7,], *АТР-ЕМРТ* и другие [8]. В работе [9] приведены анализ, выбор и обоснование показателей, характеризующих развитие витковых замыканий, необходимых для принятия решений о выводе трансформаторов из работы до появления силовой дуги в целях предотвращения взрывов и пожаров оборудования. В ряде работ [10] рассматривается влияние количества витковых замыканий в обмотках ВН трансформатора на смещение их основных резонансных частот колебаний, определяется характер оказываемого воздействия, дается рекомендация к техническому устройству для выявления витковых замыканий. Анализ высших гармонических составляющих при диагностике измерительных трансформаторов, а также

¹Трансформаторы силовые. Методы испытаний. ГОСТ 3484—77 (СТ СЭВ 1070—78, СТ СЭВ 5019—85, СТ СЭВ 5266—85), от 01.01.1978.

²ГОСТ 3484.1-88 (СТ СЭВ 1070-78) Трансформаторы силовые. Методы электромагнитных испытаний. Дата введения в действие: 01.01.1990.

маломощных силовых трансформаторов посвящена работа [11] авторов Бузмакова И.Н., и др. Одним из актуальных методов, позволяющих определять возможность или невозможность дальнейшей безопасной эксплуатации оборудования, является метод частичных разрядов [12]. Обследовано радиационно-термическое развитие витковых замыканий под воздействием частичных разрядов первого рода при загрязнении обмоток трансформаторов, автотрансформаторов металлосодержащими коллоидными частицами, образующимися в трансформаторном масле в результате взаимодействия масла с конструкционными материалами (медью обмоток, железом бака, сердечника и др.).

Представленный литературный обзор свидетельствует об актуальности проблемы обнаружения витковых замыканий в обмотках силовых трансформаторов и автотрансформаторов

Методика исследования

Сотрудники кафедры РЗА КГЭУ в течение ряда лет занимаются исследованием витковых замыканий в обмотках трехфазного трансформатора [13,14]. Данная работа посвящена измерениям с применением дифференциальных методов, направленных на обнаружение витковых замыканий в трехфазных трехстержневых трансформаторах.

Остановимся подробнее на дифференциальном методе (рис.1, 2). Возможны две схемы магнитной системы трехфазного трансформатора: полностью симметричная по магнитной системе треугольная схема (рис.1 а, сердечники фаз *A*, *B*, *C* образуют симметричную трехфазную систему), и несимметричная линейная схема (рис.1 б, сердечники фаз *A*, *B*, *C* расположены в одну линию). Так как линейная схема магнитной системы трансформатора более дешевая, поэтому большинство трехфазных трансформаторов построены по линейной схеме.

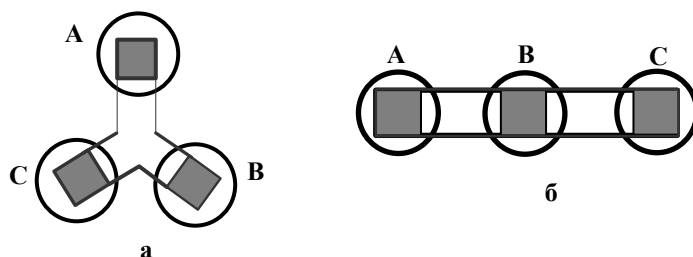


Рис.1. Варианты исполнения сердечников трехстержневых трансформаторов.

На рис. 1 а представлена полностью симметричная трехфазная схема; на рис 1б. – несимметричная линейная схема (фаза *B* отличается по симметрии от крайних фаз *A*, *C*).

При подключении источника переменного напряжения (поз. 8 на рис. 2) к центральной фазе *B* трехфазного трансформатора ток этой фазы создает в сердечниках фаз *A* и *C* одинаковые магнитные потоки, которые создают в обмотках фаз *A* и *C* одинаковые ЭДС. Обмотки фаз *A* и *C* включены встречно, поэтому датчик переменного напряжения (поз. 9 на рис. 2) покажет (в нормальном состоянии, при полной симметрии) нулевые значения. При наличии виткового замыкания в одной из фаз *A* или *C* симметрия нарушится, и датчик переменного напряжения измерит величину дисбаланса.

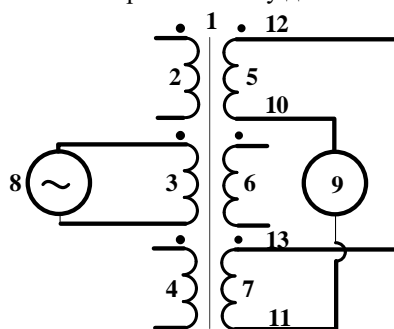


Рис. 2. Исследуемый трехфазный трансформатор.

На рис. 2. использованы следующие обозначения: 2, 3, 4 – три фазные обмотки высокого напряжения; 5, 6, 7 – три фазные обмотки низкого напряжения; 3 – фазная обмотка, выбранная в качестве питающей обмотки; 5, 7 – фазные обмотки, выбранные в качестве измерительных обмоток; 8 – источник переменного напряжения с известными

характеристиками; 9 – датчик переменного напряжения; 10, 11 – концы измерительных обмоток 5 и 7; 12, 13 – начала измерительных обмоток.

Такая симметричная картина наблюдается только при подключении источника переменного напряжения к центральной фазе B , в других случаях симметрия нарушается, и необходимо учитывать геометрию магнитной системы трансформатора. Ситуация полностью аналогична учету коэффициента трансформации в дифференциальных релейных защитах трансформатора. При подключении источника переменного напряжения к боковой фазе A (рис.3) магнитный поток Φ_a сердечника фазы A равен сумме магнитных потоков других фаз (Φ_b и Φ_c) и потоку рассеяния Φ_p . При этом, поскольку длина магнитного пути фазы B меньше, чем длина магнитного пути фазы C , магнитные потоки всех трех фаз будут разные, а именно $\Phi_a > \Phi_b > \Phi_c$

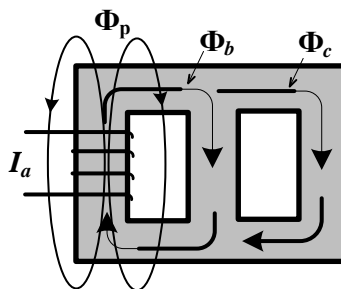


Рис.3. Распределение магнитных потоков в трехсердцевом трансформаторе при подключении источника переменного напряжения к боковой фазе A

Согласно рис. 3 ток I_a создает магнитный поток Φ_b в сердечнике фазы B , магнитный поток Φ_c в сердечнике фазы C , и магнитный поток рассеяния Φ_p . При этом в сердечнике фазы A имеется суммарный магнитный поток: $\Phi_a = \Phi_p + \Phi_b + \Phi_c$.

Для дальнейшего рассмотрения обозначим магнитные сопротивления участков сердечника трехсердцевого трансформатора (рис.4).

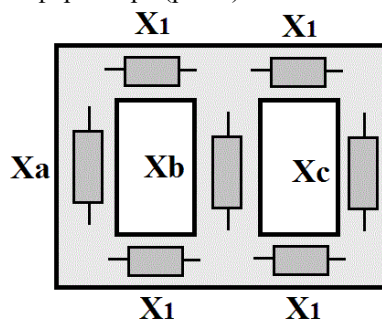


Рис.4. Магнитные сопротивления участков сердечника трехсердцевого трансформатора: X_a, X_b, X_c – вертикальные участки сердечника фаз A, B, C ; X_1 – горизонтальные участки сердечника трансформатора

При таких обозначениях можно составить эквивалентную схему магнитных сопротивлений сердечника трансформатора (рис.5) аналогично эквивалентным схемам электрических цепей.

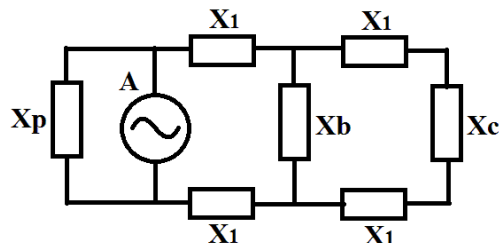


Рис.5. Эквивалентная схема магнитных сопротивлений сердечника трансформатора.

A – фаза A , как источник магнитного потока

Согласно эквивалентной схеме (рис.5) магнитный поток фазы A распределяется по сердечникам B, C и потоку рассеяния в зависимости от соотношений магнитных сопротивлений сердечника X_1, X_b, X_c и магнитного сопротивления потока рассеяния X_p . магнитное сопротивление цепи фазы C равно: $X_{\Sigma C} = 2 \cdot X_1 + X_c$, соответственно соотношения магнитных потоков фаз B и C будет равно соотношению соответствующих магнитных проводимостей (1).

$$F_1 = \frac{\Phi_c}{\Phi_b} = \frac{X_b}{2X_1 + X_c} \quad (1)$$

Аналогично (1) можно записать соотношения магнитного потока рассеяния Φ_p и суммарного магнитного потока фаз B и C

$$\frac{\Phi_p}{\Phi_b + \Phi_c} = \frac{X_\Sigma}{X_p}; X_\Sigma = \frac{X_b(2X_1 + X_c)}{2X_1 + X_c + X_b} + 2X_1 \quad (2)$$

При подключении источника переменного напряжения к фазам B (F_2) и C (F_3) выражение (1) примет следующий вид:

$$F_2 = \frac{\Phi_c}{\Phi_a} = \frac{2X_1 + X_a}{2X_1 + X_c}; F_3 = \frac{\Phi_a}{\Phi_b} = \frac{X_b}{2X_1 + X_a} \quad (3)$$

Из выражений (1) и (3) видно, что $F_2 = F_1 / F_3$, таким образом F_2 оказывается зависимым от F_1 и F_3 , и может служить проверочным для уменьшения вероятности ошибок измерения.

Результаты исследования

Если рассматривать только простые выражения (1) и (3), то при трех измерениях, выполненных при подключении источника переменного напряжения к фазам A , B и C , имеется два независимых выражения F_1 и F_3 , из которых невозможно определить четыре неизвестные переменные X_1 , X_b , X_c и X_p . Поэтому требуются дополнительные начальные данные, а именно определенные на исправном трансформаторе эталонные выражения F_{10} , F_{20} и F_{30} , с которыми будут сравниваться измеренные в процессе эксплуатации трансформатора выражения F_1 , F_2 и F_3 . Из сравнения измеренных и эталонных значений можно будет делать вывод о наличии или отсутствии витковых замыканий трансформатора.

Считая сечение магнитопровода везде одинаковым [15], и зная длину магнитного пути сердечника трансформатора, можно рассчитать магнитные сопротивления X_a , X_b , X_c , X_1 . Длина магнитного пути поперечных пластин трансформатора *Trihal* мощностью 160 кВА, фирмы «SchneiderElectric», который использовался в данной работе, равна $L_T = 85$ см, длина магнитного пути вертикальных пластин $L_B = 103$ см. Исходя из этих длин можно определить эталонные выражения $F_{10} = F_{30} = 0,55$ и $F_{20} = 1$.

Экспериментальные значения магнитных потоков фаз трансформатора Φ_a , Φ_b и Φ_c получены из измерений напряжений холостого хода, пропорциональных соответствующим магнитным потокам.

Все измерения проводились с использованием испытательного устройства РЕТОМ 21 (Источник 2, частота 50 Гц), и с помощью РЕТОМЕТра; оба устройства фирмы «Динамика».

Витковое замыкание на сердечнике трансформатора *Trihal* создавалось двумя параллельными витками медного многожильного провода сечением $2,5 \text{ мм}^2$ (общее сечение виткового замыкания составляет 5 мм^2), длиной 130 см. Витки охватывали вертикальные участки сердечника и замыкались через механический выключатель, что позволило оперативно включать и отключать витковое замыкание во время измерений. Измерения проводились при витковом замыкании и в фазе A (крайняя фаза U) и в фазе B (центральная фаза V), поскольку фазы A и C симметричны.

Измерения при витковом замыкании в фазе А. Результаты приведены в табл. 1 (а, б, в, г, д, е).

Таблица 1

а) Напряжение подается на фазу A обмотки ВН³, фаза относительно напряжения $U_{\text{вн}}$.

$U_{\text{вн.}A(-)}$	$U_{\text{вн.}A(+)}$	$U_{\text{вн.}a(-)}$	$U_{\text{вн.}a(+)}$	$U_{\text{вн.}b(-)}$	$U_{\text{вн.}b(+)}$	$U_{\text{вн.}c(-)}$	$U_{\text{вн.}c(+)}$
297,1 В	296,9 В	3,27 В	3,26 В	2,48 В	2,47 В	0,752 В	0,749 В
$I_{\text{вн}}=5,8 \text{ мА}$	7,0 мА	$0^\circ L^4$	$0^\circ L$	$179^\circ C^5$	$179^\circ C$	$178^\circ L$	$178^\circ L$

³(-) без виткового замыкания, (+) с витковым замыканием;

⁴⁰ L - отставание вектора измеренного напряжения по отношению к вектору поданного на фазу напряжения;

⁵⁰ C - опережение вектора измеренного напряжения по отношению к вектору поданного на фазу напряжения.

Ток виткового замыкания - 12,7 А/174°C (фаза относительно подаваемого напряжения $U_{ВН}$).

Ток ВН мал, и недостаточен для измерения фазы РЕТОМЕТРОМ.

б) Напряжение подается на фазу В обмотки ВН.

$U_{ВН\cdot B(-)}$	$U_{ВН\cdot B(+)}$	$U_{НН\cdot a(-)}$	$U_{НН\cdot a(+)}$	$U_{НН\cdot b(-)}$	$U_{НН\cdot b(+)}$	$U_{НН\cdot c(-)}$	$U_{НН\cdot c(+)}$
297,5 В	297,4 В	1,667 В	0,52 В	3,27 В	3,27 В	1,56 В	2,80 В
5,9 мА	5,8 мА	180°C	150°C	0°L	0°L	180°C	174L

Ток виткового замыкания - 2,09 А /35°L.

в) Напряжение подается на фазу С обмотки ВН.

$U_{ВН\cdot C(-)}$	$U_{ВН\cdot C(+)}$	$U_{НН\cdot a(-)}$	$U_{НН\cdot a(+)}$	$U_{НН\cdot b(-)}$	$U_{НН\cdot b(+)}$	$U_{НН\cdot c(-)}$	$U_{НН\cdot c(+)}$
297,4 В	297,4 В	0,903 В	0,260 В	2,35 В	3,00 В	3,27 В	3,27 В
5,8 мА	5,8 мА	178°L	152°C	179°C	178°L	0°L	0°L

Ток виткового замыкания - 1,03 А /33°L.

г) Напряжение подается на фазу А обмотки НН.

$U_{НН\cdot A(-)}$	$U_{НН\cdot A(+)}$	$U_{ВН\cdot a(-)}$	$U_{ВН\cdot a(+)}$	$U_{ВН\cdot b(-)}$	$U_{ВН\cdot b(+)}$	$U_{ВН\cdot c(-)}$	$U_{ВН\cdot c(+)}$
4,510 В	4,444 В	407 В	397 В	246 В	239 В	93,7 В	91,1 В
123 мА	510 мА	0°C	0°C	173°C	172°C	176°C	175°C
50°L	15°L						

Ток виткового замыкания - 17,5 А /174°C.

д) Напряжение подается, на фазу В обмотки НН.

$U_{НН\cdot B(-)}$	$U_{НН\cdot B(+)}$	$U_{ВН\cdot a(-)}$	$U_{ВН\cdot a(+)}$	$U_{ВН\cdot b(-)}$	$U_{ВН\cdot b(+)}$	$U_{ВН\cdot c(-)}$	$U_{ВН\cdot c(+)}$
4,512 В	4,505 В	186,5 В	58,0 В	407,7 В	407,0 В	166,0 В	332 В
90 мА	123 мА	175°C	148°C	0°L	0°L	175°C	176°L
42°L	33°L						

Ток виткового замыкания - 3,28 А /23°L.

е) Напряжение подается на фазу С обмотки НН.

$U_{НН\cdot C(-)}$	$U_{НН\cdot C(+)}$	$U_{ВН\cdot a(-)}$	$U_{ВН\cdot a(+)}$	$U_{ВН\cdot b(-)}$	$U_{ВН\cdot b(+)}$	$U_{ВН\cdot c(-)}$	$U_{ВН\cdot c(+)}$
4,512 В	4,512 В	101 В	28,2 В	237 В	354 В	407,3 В	407,1 В
122 мА	128 мА	176°C	149°C	172°C	179°L	0°L	0°L
54°L	54°L						

Ток виткового замыкания – 1,26 А/35°L.

Измерения, проводимые по дифференциальному методу.

Подается напряжение на фазу В обмотки ВН, обмотка НН соединена в звезду.

$U_B=298 В; I=(-)6,0 мА/(+)5,9 мА;$

Измеренные значения напряжения и тока в фазах А и С обмотки НН составили:

$U_{(A-C)НН} = (-)0,084 В / 85L; (+)2,42 В / 14°C$

При напряжении $U_B= 297,7 В$ и токе $I = (-)6,0 мА/(+)5,9 мА$ соответственно

$U_{(A-C)НН}=(-)0,168 В / 170L, (+)2,39 В / 13°C.$

Подается напряжение на фазу В обмотки НН, обмотка ВН соединена в звезду.

$U_B=4,507 В; I=(-)94.4 мА, (+)129,4 мА;$

Полученные величины напряжения в фазах А и С обмотки ВН

$U_{(A-C)ВН}= (-)10,42В / 173°C, (+)248,5 В / 9°C.$

Измерения при витковом замыкании в фазе В. Результаты приведены в табл. 2 (а, б, в, г, д, е)

Таблица 2

а) Напряжение подается, на фазу А обмотки ВН.

$U_{ВН\cdot A(-)}$	$U_{ВН\cdot A(+)}$	$U_{НН\cdot a(-)}$	$U_{НН\cdot a(+)}$	$U_{НН\cdot b(-)}$	$U_{НН\cdot b(+)}$	$U_{НН\cdot c(-)}$	$U_{НН\cdot c(+)}$
297,9 В	298,0 В	3,27 В	3,27 В	2,40 В	0,600 В	0,860 В	2,47 В
5,9 мА	5,7 мА	0°L	0°L	179°C	145°C	178°L	173°L

Ток виткового замыкания - 2,29А/41°L.

б) Напряжение подается на фазу В обмотки ВН.

$U_{ВН\cdot B(-)}$	$U_{ВН\cdot B(+)}$	$U_{НН\cdot a(-)}$	$U_{НН\cdot a(+)}$	$U_{НН\cdot b(-)}$	$U_{НН\cdot b(+)}$	$U_{НН\cdot c(-)}$	$U_{НН\cdot c(+)}$
298 В	297,9 В	1,696 В	1,689 В	3,27 В	3,26 В	1,543 В	1,537 В
6,0 мА	7,2 мА	180°C	179°C	0°C	0°L	179°C	179°C

Ток виткового замыкания – 12,30А/173°C.

в) Напряжение подается на фазу С обмотки ВН.

$U_{ВН\cdot C(-)}$	$U_{ВН\cdot C(+)}$	$U_{НН\cdot a(-)}$	$U_{НН\cdot a(+)}$	$U_{НН\cdot b(-)}$	$U_{НН\cdot b(+)}$	$U_{НН\cdot c(-)}$	$U_{НН\cdot c(+)}$
298,0 В	298 В	0,937 В	2,78 В	2,30 В	0,576 В	3,27 В	3,27 В
5,8 мА	5,7 мА	178°L	174°L	179°C	145°C	0°L	0°L

Ток виткового замыкания – 2,18А/42°L.

г) Напряжение подается на фазу *A* обмотки НН.

$U_{\text{НН} \cdot A}(-)$	$U_{\text{НН} \cdot A}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot a}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot a}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot b}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot b}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot c}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot c}(+)$
4,457 В	4,449 В	402,8 В	402,1 В	235 В	56,7 В	96,1 В	328,4 В
122мА	154мА	0°L	0°L	173°С	143°С	175°С	176°С
50°L ⁶	52°L						

Ток виткового замыкания – 2,95А/42L.

д) Напряжение подается на фазу *B* обмотки НН.

$U_{\text{НН} \cdot B}(-)$	$U_{\text{НН} \cdot B}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot a}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot a}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot b}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot b}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot c}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot c}(+)$
4,497 В	4,423 В	186,0 В	182,1 В	407,1 В	398,3 В	165,2 В	161,3 В
99 мА	533 мА	175°С	174°С	0°L	0°L	175°С	174°С
52°L	14°L						

Ток виткового замыкания – 16,57А/173С.

е) Напряжение подается на фазу *C* обмотки НН.

$U_{\text{НН} \cdot C}(-)$	$U_{\text{НН} \cdot C}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot a}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot a}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot b}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot b}(+)$	$U_{\text{ВН} \cdot c}(-)$	$U_{\text{ВН} \cdot c}(+)$
4,422 В	4,410 В	94,7 В	327,7 В	231,2 В	53,7 В	399,5 В	398,8 В
126мА	155мА	176°С	176L	173°С	142°С	0°L	0°L
51°L	52°L						

Ток виткового замыкания – 3,36 А/28L.

Измерение зависимости дифференциального напряжения и тока виткового замыкания от сечения виткового замыкания

Для этого витковое замыкание формируется из одного, двух, трех, четырех параллельных витков многожильного медного провода сечением 2,5 мм², на фазе *A* трансформатора (табл. 3). Измеряется напряжение обмотки НН между фазами *A* и *C*; Ретом 21 подключен к фазе *B* обмотки ВН, $U_B=301,6$ В (табл. 4 а,б).

Таблица 3

Сечение, мм ²	(-) U_{ac} , НН	(+) U_{ac} , НН	$I_{\text{витка}}$
10	0,092 В / 87°L	2,76 В / 8°С	2,32 А / 42°L
7,5	0,081 В / 88°L	2,68 В / 9°С	2,26 А / 41°L
5	0,107 В / 98°L	2,42 В / 14°С	2,04 А / 35°L
2,5	0,110 В / 93°L	1,837 В / 24°С	1,599 А / 25°L

Таблица 4

а) Измерение зависимости дифференциального напряжения от напряжения U_B на фазе *B* обмотки ВН, витковое замыкание сечением 10 мм².

U_B	(-) U_{ac} , НН	(+) U_{ac} , НН
50,66В	0,039 В	0,365 В / 18°С
101,0В	0,052 В / 91°L	0,826 В / 12°С
153,2В	0,065 В / 83°L	1,312 В / 10°С
200,7В	0,076 В / 83°L	1,760 В / 9°С
251,4В	0,095 В / 84°L	2,28 В / 8°С
301,6В	0,107 В / 85°L	2,75 В / 8°С

б) Измерение зависимости дифференциального напряжения от частоты напряжения U_B в фазе *B* обмотки ВН, витковое замыкание сечением 10 мм².

$F(U_B)$, Гц	(-) U_{ac} , НН	(+) U_{ac} , НН
50	0,110 В	2,75 В
50	0,084 В *	2,68 В *
100	0,115 В *	2,74 В *
150	0,136 В *	2,75 В *
200	0,143 В *	2,76 В *

*- Измерения на частотах, больших 50 Гц, проводились с помощью тестера ДТ9205А, поскольку РЕТОМЕТР не предназначен для измерений на этих частотах.

Анализ результатов измерений

Стандартные измерения тока холостого хода и потерь холостого хода [17]. Определены относительные изменения тока холостого хода и мощности потерь при наличии виткового замыкания (медный многожильный провод сечение 5 мм², длиной 130 см), относительно соответствующих величин при отсутствии виткового замыкания (табл. 5).

⁶ - фаза вектора подаваемого тока относительно фазы вектора подаваемого напряжения.

Таблица 5

Стандартные измерения тока.

Витковое замыкание	Источник напряжения подключен к НН	Отношение тока источника (с витком/без витка)	Отношение мощности потерь (с витком/без витка)	Ток в проводе виткового замыкания, A
в фазе A	фаза A	4,1	6,1	17,5
	фаза B	1,4	1,5	3,28
	фаза C	1,05	1,05	1,26
в фазе B	фаза A	1,3	1,21	2,95
	фаза B	5,4	8,35	16,57
	фаза C	1,2	1,20	3,36

Результаты расчета показывают существенное отличие тока и мощности потерь при подключении источника напряжения к фазе с витковым замыканием относительно случаев подключения источника напряжения к другим фазам.

Рассмотрим дифференциальные измерения, при наличии виткового замыкания (медный многожильный провод сечение 5 мм^2 , длиной 130 см) в фазе A , и при подключении источника напряжения к фазе B , измеряем разность напряжений между фазами A и C (при соединении фаз по схеме «звезда») (табл. 6).

Таблица 6

Отношение дифференциального напряжения.

	Отношение дифференциального напряжения (с витком / без витка)
Источник питания подключен к обмотке ВН, измерения проводятся на обмотке НН	21
Источник питания подключен к обмотке НН, измерения проводятся на обмотке ВН	23

Поскольку дифференциальный метод очень чувствителен к симметрии трансформатора в нормальном режиме (одинаковость магнитных сопротивлений между фазами $A-B$ и $B-C$, без виткового замыкания), то остаточные намагниченности сердечника трансформатора (различающиеся по разным фазам) могут дать большой разброс измерений. При этом остаточную намагниченность формирует как предыдущие измерения, так и включение/отключение виткового замыкания.

В результате выполненных исследований выявлена необходимость плавного увеличения прикладываемого напряжения источника для проведения измерений, и также плавного уменьшения прикладываемого напряжения источника до нуля по завершению эксперимента.

Проведенные исследования показали высокую чувствительность дифференциального метода к наличию виткового замыкания в крайних фазах (A , C) трансформатора.

Измерения же зависимости дифференциальных измерений от сечения виткового замыкания продемонстрировали слабую зависимость дифференциального сигнала от сечения виткового замыкания. Результаты измерений приведены ниже в табл. 7.

Таблица 7

Результаты измерений.

Сечение, мм^2	I витка, A	Отношение дифференциального напряжения (с витком / без витка)
10	2,32	30
7,5	2,26	33
5	2,04	23
2,5	1,599	17

В результате измерений зависимости дифференциального напряжения (U_{ac} НН) от величины прикладываемого к фазе B обмотки ВН напряжения (сечение виткового замыкания 10 мм^2), выявлена высокая чувствительность дифференциального метода даже при сильном уменьшении величины прикладываемого напряжения (табл. 8).

Таблица 8

Результаты измерений зависимости дифференциального напряжения.

$U_B, В$	Отношение дифференциального напряжения (с витком / без витка)
50,66	9
101,0	16
153,2	20
200,7	23
251,4	24
301,6	26

При измерениях зависимости дифференциального напряжения ($U_{аснн}$) от величины прикладываемой к фазе B обмотки ВН частоты напряжения $U_B=301,6 В$, сечение виткового замыкания 10 мм^2 . С увеличением частоты прикладываемого напряжения U_B чувствительность дифференциального метода снижается, что очевидно вызвано увеличением магнитного сопротивления сердечника трансформатора с увеличением частоты питающего напряжения (табл. 9).

Таблица 9

Результаты измерений зависимости дифференциального напряжения.

$F(U_B), Гц$	Отношение дифференциального напряжения (с витком / без витка)
50	25
50	32
100	24
150	20
200	19

Дифференциальный метод, при витковом замыкании на одной из крайних фаз (A или C) трехфазного трансформатора, можно применять напрямую, без учета магнитных сопротивлений разных участков трансформатора. При витковом замыкании на центральной фазе B , необходим учет магнитных сопротивлений разных участков трансформатора в нормальном режиме, без повреждений [16, 17-19], а именно задание величин F_{10}, F_{30} . Для данного трансформатора *Trihal* теоретические величины, подсчитанные из линейных размеров трансформатора, равны: $F_{10} = F_{30} = 0,55$. Экспериментальные величины подсчитаны из отношений измеренных напряжений двух фаз (например фаз B и C , при подключении источника напряжения к фазе A), в отсутствии виткового замыкания (табл. 10).

Таблица 10

Экспериментальные величины из отношений измеренных напряжений двух фаз.

Фаза, к которой подключается источник питания	Отношение напряжений фаз	Источник питания на обмотке ВН	Источник питания на обмотке НН
фаза A	$F_{10} = \frac{U_c}{U_b}$	0,36	0,41
фаза C	$F_{30} = \frac{U_a}{U_b}$	0,41	0,43

Видна изначальная (в отсутствии витковых замыканий) несимметрия, разность магнитных сопротивлений фаз A и C . Для однозначности примем $F_{10}=0,41, F_{30}=0,43$. Несимметрия магнитных сопротивлений фаз A и C проявляется и при мероприятиях по размагничиванию сердечника трансформатора, при которых на фазных обмотках НН напряжение плавно повышалось с 0 В до 12,74 В, и затем плавно уменьшалась до 0 В. При этом максимальные токи фаз уже были разные: $I_a=234,4 \text{ мА}, I_b=192,2 \text{ мА}, I_c=246,5 \text{ мА}$. Также наблюдается разница между теоретическими значениями $F_{10} = F_{30} = 0,55$ и экспериментально измеренными значениями $F_{10} = 0,41, F_{30} = 0,43$. Данная разница может быть связана с большим количеством стыков пластин сердечника боковых фаз A и C , по сравнению со центральной фазой B .

Наличие виткового замыкания в фазе B (сечением 5 мм^2) обнаруживалось по соотношениям измеренных и эталонных значений $F_1/F_{10}, F_3/F_{30}$ (табл. 11).

Соотношение измеренных и эталонных значений

	Источник питания на обмотке ВН	Источник питания на обмотке НН
F_1/F_{10}	10	14
F_3/F_{30}	11	17

Выявлена высокая чувствительность дифференциального метода и для виткового замыкания на центральной фазе *B*.

Выводы

В работе исследован дифференциальный метод обнаружения витковых замыканий в трехфазных линейных трансформаторах, предложена методика дифференциальных измерений для обнаружения витковых замыканий в различных фазах трансформатора. Приведены данные измерения напряжения холостого хода, пропорциональные соответствующим магнитным потокам трехфазного линейного трансформатора общего назначения с использованием дифференциальных методов, направленных на обнаружение витковых замыканий в обмотках линейных трехсерийных трансформаторов.

В результате исследования выявлена большая чувствительность дифференциального метода по сравнению с традиционным методом тока и мощности холостого хода трансформатора.

Литература

1. Bhide R S.; Srinivas M.S.; Iliia Voloh. Detection of inter-turn fault in transformers at incipient level // Detection of inter-turn fault in transformers at incipient level, 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2-5 Sept. 2014.
2. Смирнова И.В., Павлова К.В., Белянин А.А. Распознавание витковых замыканий в автотрансформаторе методом локализации // Проблемы и перспективы развития энергетики, электротехники и энергоэффективности, Чебоксары, 18-19 октября 2018 г. С: 28-32.
3. 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.
4. Ramesh K., Sushama M. Inter-Turn Fault Detection in Power transformer Using Wavelets // International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE - ISSN: 2320-9569). 2014. V. 10. Issue. 10.
5. Rupali Chavhan DR., Kulkarni V.A. Negative Sequence Component for Detection of Inter-Turn Fault of Transformer // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2017. V. 6, Issue 7. July 2017, pp. 13950-13958
6. Guillena D, Olivares-Galvanb J.C., Escarela-Perez R, et al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization // Measurement. 2019. V. 141. pp. 24-36.
7. Новожилов А.Н., Колесников Е.Н., Новожилов Т.А. Моделирование токов в обмотках трехфазного трехобмоточного трансформатора при витковом замыкании // Технические науки: Проблемы и решения. Сборник статей по материалам 22 международной научно-практической конференции. 2019. С.149-160.
8. Díaz González G., Gómez-Aleixandre Fernández J., and Arboleya Arboleya P. (2004). Electromagnetic model of turn-to-turn short circuits in transformers, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2004. V. 23 N. 2. pp. 558-571.
9. Львов С.Ю. Показатели, характеризующие развитие витковых замыканий в силовых трансформаторах, и их контроль в эксплуатации // Энергетик. 2012. №6. С. 22-24.
10. Градов А.А., Макарова Н.Л. Экспериментальные исследования витковых замыканий // Электрооборудование: Эксплуатация и ремонт. 2012. №10. С. 30-35.
11. Бузмаков И.Н., Литвинов И.И., Танфилов О.В. Анализ высших гармоник тока намагничивания для выявления витковых замыканий трансформатора // Наука. Технологии. Инновации, Новосибирск, 02-06 декабря 2019 г. С.124-126.
12. Львов С.Ю., Лютко Е.О., Бондарева В.Н., и др. О развитии витковых замыканий при загрязнении обмоток трансформаторов металлосодержащими коллоидными частицами // Электрические станции. 2011. № 7. С. 43-49.
13. Дифференциальный способ обнаружения витковых замыканий в трехфазном трансформаторе. Изобретение RU2714532C1 от 14.05.2019.
14. Мустафин Р.Г. Обнаружения витковых замыканий обмоток трансформаторов по параметрам переходного процесса. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019; №21(3):14-23.

15. Плотников Д.И., Паламарчук Д.В., Мельников Н.А., и др. Межвитковые короткие замыкания в силовых трансформаторах // Академический журнал Западной Сибири. 2017. №4 (71). Т.13 С. 28-32.

16. Градов А.А., Макарова Н.Л. Проблема выявления витковых замыканий силового трансформатора и ее решение. Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2012. № 9. С.42-47.

17. Wiszniewskia A., Solaka K., Rebizanta W, et al. International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 95, February 2018. pp. 301-306. Calculation of the lowest currents caused by turn-to-turn short-circuits in power transformers.

18. Schneider Electric, Trihal, p. 37 / https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3_Trihal_2016.pdf&p_Doc_Ref=MKP-CAT-TRIHAL-16.

19 ABB Instrument Transformers: Application Guide, 2015, p. 134. <https://library.e.abb.com/public/94c2ba5a2f381077c1257df000504e0c/1HSM%209543%204000en%20IT%20Application%20Guide%20Ed4.pdf>.

Авторы публикации

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

Ярыш Равия Фоатовна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Bhide RS; Srinivas MS, et al. *Detection of inter-turn fault in transformers at incipient level*. Detection of inter-turn fault in transformers at incipient level, 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2-5 Sept. 2014. doi: 10.1109/ICELMACH.2014.6960387.

2. Smirnova IV, Pavlova KV, Belyanin AA. Recognition of loop closures in the autotransformer by localization method. *Problems and prospects of development of power engineering, electrical engineering and energy efficiency*. Cheboksary, October 18-19, 2018. pp. 28-32.

3. Klimova TG, Smirnov VS. Modeling of loop closures in the windings of a power transformer in the software complex MATLAB / SIMULINK . *Electric Power. transmission and distribution*. 2019;4 (55):98-105.

4. 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).

5. Rupali Chavhan DR., Kulkarni VA. Negative Sequence Component for Detection of Inter-Turn Fault of Transformer. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2017;6(7):13950-13958.

6. Guillena D, Olivares-Galvanb JC, Escarela-Perez R., et al. Diagnosis of interturn faults of single-distribution transformers under controlled conditions during energization. *Measurement*. 2019;141:24-36. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.03.044>.

7. Novozhilov AN, Kolesnikov EN, Novozhilov TA. Modeling of currents in the windings of a three-phase three-winding transformer with a loop closure. *Technical Sciences: Problems and solutions*. Collection of articles based on the materials of the 22 th international scientific and practical conference. 2019.P. 149-160.

8. Díaz González G, Gómez-Aleixandre Fernández J. and Arbolea Arbolea P. (2004), Electromagnetic model of turn- to-turn short circuits in transformers, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. 2004;23(2):558-571. <https://doi.org/10.1108/03321640410510749>.

9. Lviv SYu. Indicators that characterize the development of loop closures in power transformers, and their control in operation. *Energetik*. 2012;6:22-24.

10. Gradov AA, Makarova NL. *Experimental studies of loop closures. Electrical Equipment: Operation and repair*. 2012;10:30-35.

11. Buzmakov IN, Litvinov II, Tanfilov OV. Analysis of the higher harmonics of the magnetization current for detecting transformer loop closures. *Nauka. Technologies. Innovations*. Novosibirsk, 02-06 December 2019, pp. 124-126.

12. Lviv SYu, Lyutko EO, Bondareva VN. On the development of loop closures in case of contamination of transformer windings with metal-containing colloidal particles. *Electric stations*. 2011;7:43-49.

13. *Differential method for detecting loop closures in a three-phase transformer*. The invention RU2714532C1 from 14 may 2019.

14. I Mustafin RG. Detecting short circuits of the windings of transformers in the parameters of the transition process. News of higher educational institutions. *ENERGY PROBLEM*. 2019;21(3):14-23. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-14-23>.

15. Plotnikov DI, Palamarchuk DV, Melnikov NA, et al. Inter-turn short circuits in power transformers. *Academic journal of Western Siberia*. 2017;4(71):13:28-32.

16. Gradov AA, Makarova NL. The Problem of detecting loop closures of a power transformer and its solution. *Electrical equipment: operation and repair*. 2012;9:42-47.

17. Wiszniewskia A, Solaka K, Rebizanta W., et al. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 2018;95:301-306. *Calculation of the lowest currents caused by turn-to-turn short-circuits in power transformers*. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.028>.

18. Schneider Electric, Trihal, p.37 / https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3_Trihal_2016.pdf&p_Doc_Ref=MKP-CAT-TRIHAL-16

19. ABB Instrument Transformers: Application Guide, 2015, p. 134 / <https://library.e.abb.com/public/94c2ba5a2f381077c1257df000504e0c/1HSM%209543%2040-00en%20IT%20Application%20Guide%20Ed4.pdf>.

Authors of the publication

Ramil G. Mustafin – Kazan State Power Engineering University. Email: ramil.mustafin@gmail.com.

Raviya F. Yarish – Kazan State Power Engineering University.

Поступила в редакцию

23 марта 2020г.