

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 2 (2024)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и информационных
систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ZSHT7059>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.,

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә. Б. *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никитин К. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцен;</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Омарова А.Р.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

МРНТИ 621.313.3

<https://doi.org/10.48081/VMFW1810>

***Е. Н. Колесников¹, Т. А. Новожилов², Ж. С. Исенов¹,
О. М. Талипов¹**

¹Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

²Омский государственный технический университет,

Российская федерация, г. Омск

*e-mail: jeka89_pvl@mail.ru

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРЕХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ДВУХ МАГНИТНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА

В электроэнергетических системах наибольшее распространение получили трехфазные трехобмоточные трансформаторы. Одним из наиболее часто встречающихся в них замыканий является витковое замыкание (ВЗ). Для защиты от них в настоящее время практически всегда используются традиционные токовые защиты. Однако они имеют низкую чувствительность к ВЗ. В настоящее время появились высокочувствительные защиты трехфазных трехобмоточных трансформаторов на магнитных трансформаторах тока. Они просты по конструкции, дешевы и способны защитить такой трансформатор от всех видов замыканий в их обмотках. В данной статье предложено устройство защиты трехфазного трехобмоточного трансформатора на магнитных трансформаторах тока. Описано взаимное расположение элементов трансформатора и МТТ и схема защиты. Так же представлены результаты экспериментальных исследований предложенного устройства защиты трехфазного трехобмоточного трансформатора проведенные в лаборатории кафедры Электроэнергетика НАО «Торайгыров университет».

Приведены осциллограммы тока в замыкающихся витках первичной обмотки трехфазного трансформатора и ЭДС на выходе МТТ в режиме нагрузки, и включения в сеть трансформатора ТТ-6 в режиме холостого хода.

Чувствительность предложенной защиты трехфазного трехобмоточного трансформатора на магнитных трансформаторах тока. в экспериментальном трансформаторе составила порядка 0,2-0,4 %.

Ключевые слова: трехфазный трехобмоточный трансформатор, замыкания в обмотках, магнитный трансформатор тока, релейная защита, экспериментальные исследования.

Введение

В электроэнергетических системах наибольшее распространение получили трехфазные трехобмоточные трансформаторы. Ими только в России укомплектовано порядка 461864 трансформаторных подстанций [1].

Из мировой практики эксплуатации трехфазных трансформаторов известно, что одним из наиболее часто встречающихся в них замыканий является витковое замыкание (ВЗ). В соответствии с [2; 3; 4; 5] на их долю в зависимости от мощности и условий эксплуатации приходится до 70-80% от всех отказов трансформатора.

Для защиты от них в настоящее время практически всегда используются традиционные токовые защиты, среди которых максимальные токовые защиты, токовые отсечки и дифференциальные токовые защиты [5;6]. Однако они имеют низкую чувствительность к ВЗ. Более чувствительны к ВЗ защиты на двух магнитных трансформаторах тока (МТТ), которые размещаются внутри бака трансформатора [7].

Материалы и методы

Взаимное расположение элементов трансформатора и МТТ и схема защиты показаны на рисунке 1. Как видно из этого рисунка в трехфазном трансформаторе 1, на стержнях 2, 3 и 4 сердечника

которого размещаются одинаковые катушки 5, 6 и 7 с обмотками фаз А, В и С, по обмоткам высшего, среднего и низкого напряжения которым протекают трехфазные симметричные токи.

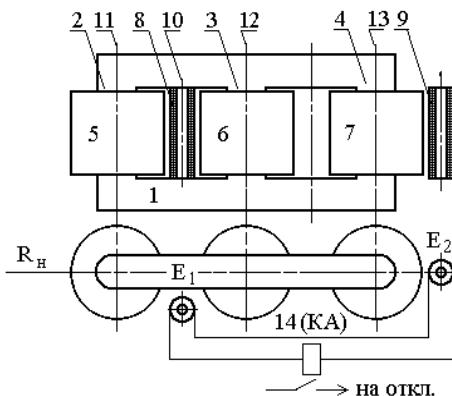


Рисунок 1 – Схемы размещения МТТ в трансформаторе и его защиты

МТТ 8 и 9 изготавливают в виде круглого стержня из текстолита длиной равной длине стержня трансформатора, на который равномерно наматывается обмотка из тонкого изолированного провода. При этом МТТ 8 закрепляется на трансформаторе так, чтобы ее ось 10 вращения была параллельна осям 11 и 12 стержней 2 и 3 фаз А и В, и располагалась на равном расстоянии от них. МТТ 9 размещается в баке трансформатора так, чтобы его ось лежала на плоскости R, которая проходит через оси 11 и 13 и была параллельна оси 13. Соединенные согласно - последовательно обмотки МТТ 8 и 9 присоединены к реагирующему органу 14 (КА), нормально разомкнутые контакты которого подключаются к цепи отключения выключателя трансформатора.

При таком пространственном расположении катушек 5-7 трансформатора и МТТ 8 ЭДС E_1 в его обмотке индуцируется только токами в обмотках катушек 5 и 6 фаз А и В, а ЭДС E_2 обмотке МТТ 9 – токами в обмотках катушки 7 фазы С [8;9].

В произвольном эксплуатационном режиме работы трансформатора по одинаковым обмоткам катушек 5-7

трансформатора 1 протекают симметричные токи, которые создают одинаковые магнитные поля рассеяния. При этом магнитные поля катушек 5 и 6 индуцируют в катушке индуктивности 8 ЭДС E_1 равную по величине, но противоположную по знаку ЭДС E_2 индуцированную в катушке индуктивности 9 магнитным полем катушки 7. В результате ЭДС на выходе измерительного преобразователя и ток в цепи реагирующего органа 14 будут равны нулю. При этом контакты реагирующего органа останутся разомкнутыми, и сигнал на отключение трансформатора будет отсутствовать.

При витковом замыкании в одной из обмоток катушек 5-7 в ней образуется дополнительный контур в виде замкнувшихся витков с током, величина которого на порядок больше тока в неповрежденной части этой обмотки. В результате изменится пространственное распределение магнитного поля катушки с поврежденной обмоткой, ЭДС E_1 и E_2 будут не равны по величине, а в цепи реагирующего органа 14 появится ток. Контакты реагирующего органа 14 замкнутся и сформируют сигнал на отключение трансформатора от сети.

При междуфазном замыкании или при однофазном замыкании на корпус пространственное распределение катушек также будет неодинаковым. Следовательно, E_1 и E_2 также будут не равны по величине, в цепи реагирующего органа 14 появится ток, контакты реагирующего органа 14 замкнутся и сформируют сигнал на отключение трансформатора от сети.

В качестве реагирующего органа в защите может использоваться токовое реле РТ-40/0,2 с встречно-взаимным соединением обмоток. Цепи постоянного оперативного тока устройства рассматриваемой релейной защиты приведены на рисунке 2, где КА – токовое реле РТ-40,0,2; КТ – реле времени, с помощью которого выставляется порог срабатывания защиты по времени; КЛ – промежуточное реле; SX – кнопка для введения защиты в работу после устранения аварии.

Как видно из рисунка 2 при срабатывании реагирующего органа контакт КА замыкается, и по обмотке реле времени КТ будет

протекать ток, Реле времени КТ сработает и через время $t_{\text{ср}}$ его контакты замкнутся. В результате по обмотке промежуточного реле станет протекать ток. Оно сработает. При этом замкнувшиеся контакты KL1.1 поставят промежуточное реле на самоподхват, а замкнувшиеся контакты KL1.2 сформируют сигнал на отключение выключателя.

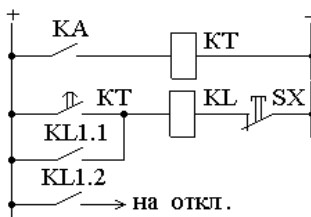


Рисунок 2 - Цепи постоянного оперативного тока устройства

В связи с неточным изготовлением и установкой как катушек трансформатора, так и МТТ в произвольном режиме работы в цепи реле 14 (КА) будет протекать ток небаланса. В связи с этим расчет порога срабатывания защиты должен осуществляться следующим образом.

Реле КА защиты не должно срабатывать при максимальных токах нагрузки трансформатора, а ток его срабатывания определяется по формуле (1) с аналогичным коэффициентом надежности принимаемым равным 1,3-1,4.

$$I_{\text{ср}} = I_{\text{нб,макс}} k_n \quad (1)$$

где $I_{\text{нб,макс}}$ – ток при максимальных токах нагрузки трансформатора;

Реле КА защиты не должно срабатывать от броска тока намагничивания, возникающего при включении трансформатора в сеть и при КЗ на выводах. Отстройка от этих режимов работы трансформатора осуществляется задержкой срабатывания по времени, которое в зависимости от требуемой величины может быть

реализовано с помощью реле времени КТ. Время задержки срабатывания защиты определяется по формуле (2), а коэффициент запаса $k_{\text{зап}}$ принимается равным 1,1-1,15с [10].

$$t_{\text{ср}} = t_{\text{пп}} k_{\text{зап}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{пп}}$ – время длительности переходного процесса.

Результаты и обсуждения

Экспериментальные исследования предложенного устройства защиты трехфазного трехобмоточного трансформатора проводились в лаборатории кафедры Электроэнергетика НАО «Торайгыров университет» под руководством д.т.н. профессора Новожилова А.Н. Параметры экспериментального трансформатора ТТ-6 представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры экспериментального трансформатора ТТ-6

Параметры трансформатора ТТ-6	Обозначение	Величина
Напряжение питания, В	U_1	231
Ток холостого хода трансформатора, А	$I_{\text{хх}}$	0,127
Номинальный ток в обмотках высокого, среднего и низкого напряжений, А	I_A, I_{a_1}, I_{a_2}	9,11, 14,2, 7,1
Число витков в обмотках высокого,	w_1, w_2, w_3	252, 134, 31

среднего, низкого напряжений, вит.		
Активное сопротивление обмоток высокого, среднего и низкого напряжений, Ом	R_1, R_2 и R_3	0,9, 0,2, 0,1
Активные сопротивления нагрузки обмоток среднего и низкого напряжения, Ом	$R_{на1}$ и $R_{на2}$	46 и 0-10

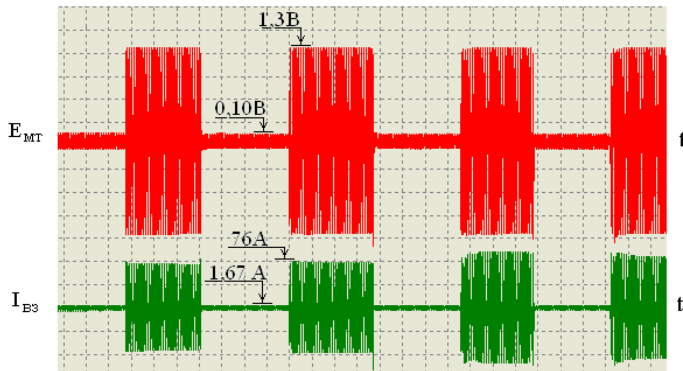


Рисунок 3 – Осциллограммы ВЗ в первичной обмотке ТТ-6 в режиме нагрузки

Результаты экспериментального исследования защиты трансформатора ТТ-6 в виде осциллограмм тока в замыкающихся витках первичной обмотки трехфазного трансформатора и ЭДС на выходе МТТ приведены на рисунке 3 в режиме нагрузки.

Осциллограммы получены при помощи программного обеспечения «Елена 2012», которое на базе ПК реализует двулучевой осциллограф. Авторами данного программного обеспечения являются Крюкова Е.В. и Новожилов Т.А. (руководитель Новожилова А. Н.).

Анализ осциллограмм на рисунке 3 показывает, что ЭДС небаланса МТ $E_{нб}$ имеет максимальное значение равное 0,10В при номинальной нагрузке. При замыкании четырех витков первичной обмотки ЭДС МТ достигает 1,36В при нагрузке.

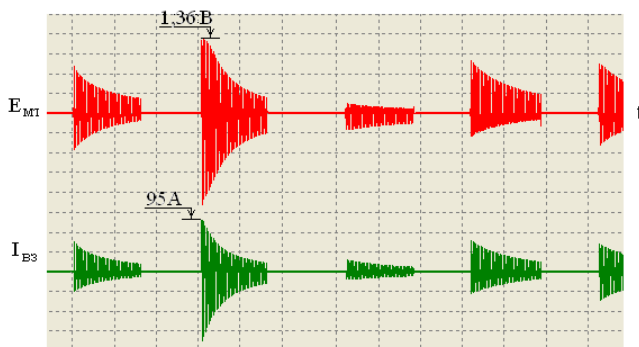


Рисунок 4 – Осциллограммы включения в сеть трансформатора ТТ-6 в режиме холостого хода

На рисунке 4 представлена осциллограмма включения в сеть экспериментального трансформатора. Согласно нее, бросок тока намагничивания достигает наибольшей величины равной 95А в режиме ХХ, а ЭДС небаланса МТ $E_{нб}$ величины равной 1.36В.

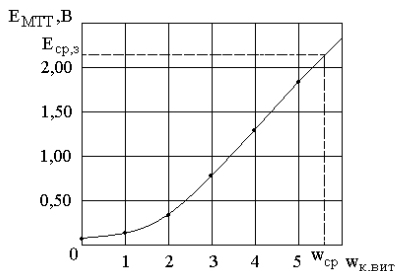


Рисунок 5 – Экспериментальная зависимость $E_{нб}$ от количества замкнувшихся витков W_k

На рисунке 5 представлена полученная экспериментально зависимость $E_{нб}$ от количества замкнувшихся витков W_k . Чувствительность защиты к ВЗ определяется отношением $W_k / W_{об}$ в процентах, где $W_{об}$ – число витков в поврежденной обмотке.

Учитывая наибольшую ЭДС небаланса МТ $E_{нб}$, ЭДС МТТ приводящая к срабатыванию защиты составит:

$$E_{ср,з} = k_n E_{нб} = 1,6 \cdot 1,36 = 2,176В \quad (3)$$

Пересечение линии $E_{ср,з}$ с графиком зависимости $E_{нб}(w_k)$ на рисунке 5 позволяет оценить чувствительность защиты. Как видно из него, защита чувствительна к замыканию 6 витков первичной обмотки.

Информация о финансировании

Это исследование было профинансировано Министерством Науки и Высшего Образования Республики Казахстан (ИРН AP14972779).

Выводы

1 Предлагаемая токовая защита проста и дешева, легко реализуется на трехфазных трехобмоточных трансформаторах и способна реагировать на все виды замыканий в их обмотках.

2 В экспериментальном трансформаторе чувствительность защиты к ВЗ составила порядка 0,2-0,4%. Есть все основания полагать, что чувствительность защиты на двух МТТ трехфазных трехобмоточных трансформаторов с другими параметрами будет аналогичной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Казакул, А. А., Кушнарёва, Ю. А.**, Анализ количества работающих трансформаторов на подстанциях филиалов АО «ДРСК». Главный энергетик. 2022;10.

2 **Засыпкин, А.С.** Релейная защита трансформаторов [Текст] / Засыпкин А.С. –М. : Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.

3 **Уолтер, А. Элмор**, Теория и применение релейной защиты [Protective Relaying Theory and Applications], Marcel Dekker Inc. Нью-Йорк, Базель, 2004..

4 **Шабад, М. А.** “Защита трансформаторов и распределительной сети”, Энергоиздат, -1981 [in Russian].

5 **Новожилов, А. Н., Новожилов, Т. А.** Релейная защита однофазного трансформатора на магнитных трансформаторах тока / - Павлодар: Изд-во ПГУ, - 2017г. – 117 с. с ил.

6 **Чернобровов, Н. В.** Релейная защита. – 4-е издание [Текст] / Чернобровов Н. В. –М. : Энергия, 1974. – 680 с.

7 Иннов. пат. №26738 РК. МПК H02H 7/04. Устройство защиты трехфазного трансформатора от замыканий обмоток / Новожилов А. Н., Новожилов Т. А., Колесников Е. Н. и др.; опубл. 15.03.13, Бюл. №3. – 3 с.

8 **Симони, К.** Основы электротехники [Foundations of Electrical Engineering], The Maximillan Company, Нью-Йорк, 1963.

9 **Бессонов, Л. А.**, Теоретические основы электротехники, Высшая школа, Москва, 1967 [in Russian].

10 **Беркович, М. А., Молчанов, В. В., Семенов, В. А.** Основы техники релейных защит. – М. : Энергоатомиздат 1984. - 232 с.

REFERENCES

1 **Kazakul, A. A., Kushnaryova, Yu. A.**, Analiz kolichestva rabotayushhix transformatorov na podstanciyax filialov AO «DRSK» [Analysis of the number of working transformers at substations of branches of JSC «DRSK»]. Glavny`j e`nergetik. 2022;10.

2 **Zasy`pkin, A. S.** Relejnaya zashhita transformatorov [Text] [Relay protection of transformers] / Zasy`pkin A.S. – Moscow : E`nergoatomizdat, 1989. – 240p.

3 **Walter, A. Elmore**, Protective Relaying Theory and Applications, Marcel Dekker Inc. New York, Basel, 2004..

4 **Shabad, M. A.** «Protection of transformers of distribution networks», Energoizdat, -1981 [in Russian].

5 **Novozhilov, A. N., Novozhilov, T. A.** Relejnaya zashhita odnofaznogo transformatora na magnitny`x transformatorax toka [Relay protection of a single-phase transformer on magnetic current transformers] / - Pavlodar: Izd-vo PGU, – 2017g. – 117p. s il.

6 **Chernobrovov, N. V.** Relejnaya zashhita [Relay protection]. – 4-e izdanie [Text] / Chernobrovov N.V. – Moscow : E`nergiya, 1974. – 680 p.

7 Innov. pat. №26738 RK. MPK N02N 7/04. Ustrojstvo zashhity` trexfaznogo transformatora ot zamy`kanij obmotok [Three-phase transformer protection device against winding short circuits] / Novozhilov A. N., Novozhilov T. A., Kolesnikov E.N. i dr.; opubl. 15.03.13, Byul. №3. – 3 p.

8 **Simonyi, K.** Foundations of Electrical Engineering, The Maximillan Company, New York, 1963.

9 **Bessonov, L. A.**, «Theoretical foundations of electrical engineering», Vysshaya shkola, Moscow, 1967 [in Russian].

10 **Berkovich, M. A., Molchanov, V. V., Semenov V. A.** Osnovy` texniki relejny`x zashhit [Fundamentals of relay protection technology]. – Moscow : E`nergoatomizdat 1984. – 232 p.

Поступило в редакцию 26.03.24.

Поступило с исправлениями 29.04.24.

Принято в печать 02.06.24

* Е. Н. Колесников¹, Т. А. Новожилов², Ж. С. Исенов¹, О. М. Талипов¹

¹Торайгыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қаласы

²Омбы мемлекеттік техникалық университеті, Ресей Федерациясы, Омбы,

26.03.24 ж. баспаға түсті.

29.04.24 ж. түзетулерімен түсті.

02.06.24 ж. басып шығаруға қабылданды.

ЕКІ МАГНИТТІК ТОК ТРАНСФОРМАТОРЫНДАҒЫ ҮШ ФАЗАЛЫ ҮШ ОРАМАЛЫ ТРАНСФОРМАТОРДЫ ҚОРҒАУ ҚҰРЫЛҒЫСЫ

Электр энергетикалық жүйелерде үш фазалы үш орамалы трансформаторлар кең таралған. Оларда жиі кездесетін тұйықталулардың бірі-айналмалы тұйықталу (АТ). Олардан қорғау үшін қазіргі уақытта дәстүрлі ток қорғаныстары әрдайым қолданылады. Дегенмен, олардың АТ-ға сезімталдығы төмен. Қазіргі уақытта магниттік ток трансформаторларында үш фазалы үш орамалы трансформаторлардың жоғары сезімтал қорғаныстары пайда болды. Олар дизайны бойынша қарапайым, арзан және мұндай трансформаторды орамдарындағы барлық тұйықталулардан қорғай алады. Бұл мақалада магниттік ток трансформаторларындағы үш фазалы үш орамалы трансформаторды қорғау құрылғысы ұсынылған. Трансформатор мен МТТ элементтерінің өзара орналасуы және қорғаныс схемасы сипатталған. Сондай-ақ «Торайгыров университеті» КЕАҚ Электр энергетикасы кафедрасының зертханасында өткізілген үш фазалы үш орамалы трансформаторды қорғаудың ұсынылған құрылғысының эксперименттік зерттеулерінің нәтижелері ұсынылды.

Жүктеме режимінде МТТ шығысында үш фазалы трансформатордың және ЭҚК бастапқы орамасының тұйықталу

бұрылыстарында токтың осциллограммалары және бос жүріс режимінде тт-6 трансформаторын желіге қосу келтірілген.

Магниттік ток трансформаторларындағы үш фазалы үш орамалы трансформатордың ұсынылған қорғанысының сезімталдығы. эксперименттік трансформаторда ол шамамен 0,2-0,4 % құрады.

Кілтті сөздер: үш фазалы үш орамалы трансформатор, орамдағы тұйықталу, магниттік Ток трансформаторы, релелік қорғаныс, эксперименттік зерттеулер.

*E. N. Kolesnikov¹, T. A. Novozhilov², Ж.С. Исенов¹, О. М. Talipov¹

¹Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

²Omsk State Technical University, Russian Federation, Omsk,

Received 26.03.24.

Received in revised form 29.04.24.

Accepted for publication 02.06.24.

PROTECTION DEVICE FOR A THREE-PHASE THREE-WINDING TRANSFORMER ON TWO MAGNETIC CURRENT TRANSFORMERS

Three-phase three-winding transformers have become the most widespread in electric power systems. One of the most common closures in them is the winding closure (WC). Currently, traditional current protections are almost always used to protect against them. However, they have a low sensitivity to WC. Currently, highly sensitive protections for three-phase three-winding transformers on magnetic current transformers have appeared. They are simple in design, cheap and able to protect such a transformer from all types of short circuits in their windings. In this article, a protection device for a three-phase three-winding transformer for magnetic current transformers is proposed. The mutual arrangement of the transformer and MTT elements and the protection circuit are described. The results of experimental studies of the proposed three-phase three-winding transformer protection device

conducted in the laboratory of the Department of Electric Power Engineering of NAO "Toraigyrov University" are also presented.

The oscillograms of the current in the closing turns of the primary winding of a three-phase transformer and the EMF at the MTT output in load mode, and the inclusion of the TT-6 transformer in the network in idle mode are presented.

The sensitivity of the proposed protection of a three-phase three-winding transformer on magnetic current transformers. in the experimental transformer, it was about 0.2-0.4%.

Keywords: three-phase three-winding transformer, short circuits in windings, magnetic current transformer, relay protection, experimental studies.

Теруге 03.06.2024 ж. жіберілді. Басуға 28.06.2024 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

29.9 Mb RAM

Шартты баспа табағы 22,2. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректоры: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Тапсырыс №4248

Сдано в набор 03.06.2024 г. Подписано в печать 28.06.2024 г.

Электронное издание

29.9 Mb RAM

Усл. печ. л. 22,2. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректорлар: А. Р. Омарова, М. М. Нугманова

Заказ № 4248

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz