

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

№ 4 (2022)

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/UJEG4973>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.
к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *д.т.н., профессор*
Алиферов А.И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Кошеков К.Т., *д.т.н., профессор*
Приходько Е.В., *к.т.н., профессор*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD*
Омарова А.Р., *технический редактор*

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

***Е.Н. Колесников¹, А.Н. Новожилов², Д.М. Рахимбердинова³, Т.А. Новожилов⁴**

^{1,2,3}Торайгыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар

⁴Омский Государственный Технический Университет,
Российская Федерация, г. Омск

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭДС МТТ РАСПОЛОЖЕННОГО МЕЖДУ СТЕРЖНЯМИ СЕРДЕЧНИКА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Одними из наиболее важных устройств в электроэнергетике являются однофазные и трехфазные силовые трансформаторы. При этом одним из самых ненадежных элементов в них независимо от мощности и класса напряжения, являются обмотки, а наиболее часто встречающимся электрическим повреждением обмоток - витковое замыкание. Однако традиционно используемые защиты трансформаторов на трансформаторах тока обладают низкой чувствительностью к витковым замыканиям.

Для разработки и реализации защит трехфазных трехобмоточных трансформаторов с применением магнитных трансформаторов тока (МТТ) необходимо иметь информацию о распределении магнитных полей рассеяния этих катушек в пространстве. Известны методы моделирования магнитных полей рассеяния вокруг круглого стержня. Однако одним из предполагаемых мест расположения МТТ при реализации защиты является расположение его строго между стержнями трансформатора. В статье предложен метод расчета действующего значения ЭДС индуктируемой в обмотке МТТ расположенной в данном месте.

Моделирование магнитного поля рассеяния предлагается осуществлять с помощью метода сеток (конечных разностей). Для этого расчетная область разбивается на прямоугольную сетку с шагом h . Т.е. область непрерывного аргумента заменяется конечным множеством точек. Таким образом, в методе рассматриваются разностные приближения вместо производных уравнения Пуассона.

Определение магнитного потенциала численным способом осуществляется по методу итераций с помощью персональных компьютеров (ПК)

Ключевые слова: трехфазный трехобмоточный трансформатор, моделирование магнитных полей, обмотки трансформатора, ЭДС МТТ, метод сеток.

Введение

Одним из наиболее важных устройств в электроэнергетике является однофазные и трехфазные силовые трансформаторы [1]. При этом одним из самых ненадежных элементов в них независимо от мощности и класса напряжения, являются обмотки [2-3], а наиболее часто встречающимся электрическим повреждением обмоток - витковое замыкание (ВЗ). Как показывает практика эксплуатации силовых трансформаторов на ВЗ в их обмотках приходится до 25-45% от всех повреждений [2-4] в зависимости от конструкции и мощности, а затраты на их ремонт порой сопоставимы со стоимостью самих трансформаторов. В то же время своевременное отключение трансформатора при ВЗ релейной защитой позволяет значительно сократить этот ущерб. Однако традиционно используемые защиты трансформаторов на трансформаторах тока обладают низкой чувствительностью к ВЗ [3].

Материалы и методы

Более чувствительны к ВЗ защиты, работа которых основана на измерении изменения магнитных полей рассеяния обмоток трансформатора. Для этого в релейной защите используют магнитные трансформаторы тока (МТТ) [3,5].

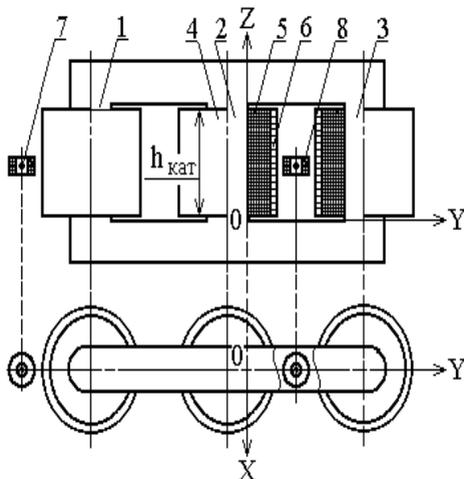


Рисунок 1 – Взаимное расположение элементов трансформатора и МТТ

Взаимное расположение элементов трансформатора и МТТ защиты приведено на рисунке 1. На этом рисунке: 1, 2 и 3 – стержни ферромагнитного сердечника трехфазного трансформатора; 4 – одна из катушек этого трансформатора; 5 и 6 – обмотка высокого и низкого напряжения; 7 и 8 – МТТ.

Разработка и реализация защиты трехфазного трансформатора на двух МТТ невозможна без расчета ЭДС этих МТТ. Как видно из рисунка 1 МТТ 7 размещается вне контура трансформатора. В связи с этим расчет его ЭДС может базироваться на методе моделирования магнитных полей рассеяния вокруг круглого стержня [6] и в данной работе не рассматривается.

МТТ 8 располагается строго между стержнями магнитопровода трансформатора. В этом случае расчет его ЭДС усложняется тем, что он окружен ферромагнитными элементами трансформатора в виде стержней 2 и 3, а также верхнего и нижнего ярм. В этом случае моделирование магнитного поля рассеяния обмоток трансформатора обычно осуществляют в следующем порядке. Первоначально, как в [6], моделируют магнитное поле рассеяния витка с током, а затем путем суммирования магнитных полей всех витков определяют магнитное поле рассеяния обмоток. Затем по величине магнитных полей рассеяния обмоток рассчитывается ЭДС МТТ.

Если допустить, что стержни магнитопровода трансформатора круглые, то для моделирования магнитного поля рассеяния витка с током используют расчетную схему, приведенную на рисунке 2. Для ее реализации поверхности стержней разворачивают вдоль оси X в плоскость, а проводник

Этот метод базируется на том, что моделирование плоского магнитного поля с помощью уравнения Пуассона [7]

$$\frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} = -\mu_0 j_x, \quad (1)$$

где A_x и j_x - тангенциальная составляющая векторного магнитного потенциала и плотности тока в витке; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума.

В данном случае его решение осуществляется при допущении того, что магнитная проницаемость ферромагнитных поверхностей элементов магнитопровода между его стержнями равна бесконечности. При этом в соответствии с [7] погрешность от этого допущения обычно не превышает 3÷5%. В специально оговоренных случаях магнитная проницаемость тонких, менее одного миллиметра, листов принимается равной μ_0 .

При использовании метода сеток (конечных разностей) [7] расчетная область разбивается на прямоугольную сетку с шагом h . То есть область непрерывного аргумента заменяется конечным множеством точек так, как показано в зоне «а» на рисунке 2. При этом вместо производных в уравнении Пуассона, рассматриваются их разностные приближения

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} &\approx \frac{A_{x(i,k+1)} - 2A_{x(i,k)} + A_{x(i,k-1)})}{h^2}, \\ \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} &\approx \frac{A_{x(i+1,k)} - 2A_{x(i,k)} + A_{x(i-1,k)})}{h^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В связи с этим во всех узлах зон «b» и «с», то есть там, где располагаются витки с током

$$A_{x(i,k)} = \frac{A_{x(i+1,k)} + A_{x(i-1,k)} + A_{x(i,k+1)} + A_{x(i,k-1)} + \mu_0 h^2 j_x}{4}. \quad (3)$$

В зоне «d» узлы с током отсутствуют. В них векторный магнитный потенциал

$$A_{x(i,k)} = \frac{A_{x(i+1,k)} + A_{x(i-1,k)} + A_{x(i,k+1)} + A_{x(i,k-1)}}{4}. \quad (4)$$

Эти уравнения составляются для каждого узла расчетной зоны. В получившейся системе задают известные значения векторного магнитного потенциала. То есть граничные условия.

Граничные условия в соответствии с [9,10] базируются на том, что тангенциальная составляющая на пограничных ферромагнитных плоскостях равна нулю. В связи с этим в углах прямоугольной расчетной зоны величину векторного магнитного потенциала следует принимать равной нулю.

С учетом того, что величина $h^2 j_x$ представляет собой ток в узлах зон b и c , в количество узлов в каждой из этих зон равно m , то тогда ток в узле определяется как

$$I_x = h^2 j_x = \frac{I_1 w_1 + I_2 w_2}{m}, \quad (5)$$

где I_1 и I_2 – ток в первичной и вторичной обмотках катушки трансформатора; w_1 и w_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках катушки трансформатора; m и n – число клеток сетки в областях b и c по горизонтали и вертикали.

Определение магнитного потенциала численным способом обычно осуществляют по методу итераций с помощью персональных компьютеров (ПК). В каждой итерации его величина определяется путем последовательного решения уравнений (3) и (4) для каждого узла расчетной схемы. В связи с этим точность моделирования магнитного потенциала с каждой итерацией повышается. С другой стороны увеличение числа итераций сопровождается увеличением числа расчетов, а следовательно погрешности расчета, которая вызвана тем, что любой ПК обладает ограниченной точностью расчетов. Таким образом, при моделировании магнитного потенциала основным критерием этого моделирования является определение числа итераций, которое необходимо для обеспечения достаточной точности.

Совместное решение уравнений (3) и (4) позволяет получить значение векторного магнитного потенциала в каждом узле. Тогда, в точке i, k

$$B_{y(i,k)} \approx \frac{A_x(i+1,k) - A_x(i,k)}{h}; \quad B_{z(i,k)} \approx \frac{A_x(i,k) - A_x(i,k+1)}{h}. \quad (5)$$

При этом действующее значение ЭДС индуктируемой в обмотке МТТ может определяться по следующему математическому выражению

$$E_{МТТ} = 4,44 f w_{МТТ} Q_{МТТ} B_z(i,k), \quad (6)$$

где f – частота тока в сети; $W_{МТТ} Q_{МТТ}$ – число витков в обмотке МТТ и площадь витка.

Результаты и обсуждение

Экспериментальная проверка возможностей этого метода проводилась на трансформаторе ТТ-6 в режиме холостого хода. Геометрические размеры этого трансформатора, необходимые для моделирования ЭДС в МТТ приведены в таблице. В качестве МТТ использовалась катушка от промежуточного реле с числом витков $W_{\text{МТТ}} = 13500$ и площадью витка равной $5,04 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. При этом полученные расчетным путем и экспериментально значения ЭДС от МТТ при протекании тока холостого хода $I_x = 0,107\text{А}$ по первичной обмотке одной из катушек трансформатора с числом витков 146 составило 0,079В и 0,088В соответственно. Таким образом, использование для моделирования магнитных полей рассеяния и ЭДС МТТ метода сеток позволяет рассчитать их с погрешностью, которая не превышает 10%. Что соизмеримо с погрешностью измерения традиционных трансформаторов тока.

Таблица. Размеры расчетной зоны для трансформатора ТТ-6

Размеры расчетной зоны	Величина
Высота расчетной зоны H , мм	140
Ширина расчетной зоны T , мм	65
Координата «у» места расположения МТТ, мм	32,5
Координата «z» места расположения МТТ, мм	70
Размеры обмотки на стержне 2 (зона b) $y_b \times H$, мм	14 × 144
Размеры обмотки на стержне 3 (зона c) $y_b \times H$, мм	14 × 144
Расстояние между узлами h , мм	5
Число клеток сетки m по горизонтали, шт	13
Число клеток сетки n по вертикали, шт	28

Выводы

Для моделирования магнитных полей между стержнями трансформатора и ЭДС в обмотке магнитного трансформатора в наибольшей степени подходит метод сеток в связи с тем, что он прост и позволяет учитывать одновременно все источники магнитного поля.

Метод сеток позволяет рассчитывать магнитные поля между стержнями трансформатора ТТ-6, а так же ЭДС в обмотке магнитного трансформатора тока, располагающегося между ними, с погрешностью равной 10%.

Это исследование было профинансировано Министерством Науки и Высшего Образования Республики Казахстан (грант № AP14972779).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Энергетика СССР в 1986–1990 годах [Текст] / Под ред. А.А. Троицкого. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 310с.
- 2 **Чернобровов, Н. В.** Релейная защита. – 4-е издание [Текст] / Чернобровов Н.В. – Москва : Энергия, 1974. – 680 с.
- 3 **Засыпкин, А. С.** Релейная защита трансформаторов [Текст] / Засыпкин А.С. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 240с.
- 4 Федосеев, А. М. Релейная защита электрических систем. – М. : Энергия, 1976. – 559 с.
- 5 **Novozhilov, A. N., Kolesnikov, E. N., Novozhilov, T. A., Kudabaev, D. A.** Simulation of fault-to-ground currents in the winding of an asynchronous motor stator in a network with insulated neutral // Russian Electrical Engineering. 2013. N. 84 (2). С. 89–93.
- 6 **Novozhilov, A. N., Novozhilov, T. A., Volgina, E. M., Kolesnikov, E. N.** et al. Magnetic field scattering of a transformer winding on a round rod for a safety relay // Russian Engineering Research. – 2020. – № 9. – P. 710–714.
- 7 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. – Москва : Высшая школа, 1967. – 775 с.
- 8 **Гринберг, Г. А.** Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. – Москва : АН СССР, 1948. – 836 с.
- 9 **Вольдек, А. И.** Основы методики расчета магнитных полей лобовых обмоток электрических машин. – Электричество, 1963, № 1.
- 10 **Новожилов, А. Н., Воликова М. П.** Коррекция токов в методе зеркальных отражений при моделировании магнитных полей электрических машин. – Электричество, 2004, № 9.

REFERENCES

1. Energetika SSSR v 1986–1990 godah [Power engineering of the USSR in 1986–1990] [Text] / Edited by A. A. Troitsky. – Moscow : Energoatomizdat, 1987. – 310 p.
2. **Chernobrov, N. V.** Releynaya zaschita [Relay protection]. – 4th edition [Text] / Chernobrov N. V. – Moscow : Energia, 1974. –680 p.
3. **Zasypkin, A. S.** Releynaya zaschita transformatorov [Relay protection of transformers] [Text] / Zasypkin A. S. – Moscow : Energoatomizdat, 1989. – 240 p.
4. **Fedoseev, A.M.** Releynaya zaschita energeticheskikh system [Relay protection electrical systems]. – Moscow : Energiya, 1976. – 559 p.
5. **Novozhilov, A. N., Kolesnikov, E. N., Novozhilov, T. A., Kudabaev, D. A.** Simulation of fault-to-ground currents in the winding of an asynchronous

motor stator in a network with insulated neutral // Russian Electrical Engineering. 2013. N. 84 (2). P. 89–93.

6. **Novozhilov, A. N., Novozhilov, T. A., Volgina, E. M., Kolesnikov, E.N.** et al. Magnetic field scattering of a transformer winding on a round rod for a safety relay // Russian Engineering Research. – 2020. – No. 9. – P. 710–714.

7. **Bessonov, L. A.** Teoreticheskie osnovi elektrotehniki [Theoretical foundations of electrical Engineering]. – Moscow : Higher School, 1967. – 775 p.

8. **Grinberg, G. A.** Izbrannie voprosi matematicheskoi teorii elektricheskikh I magnitnih yavleniy [Selected questions of the mathematical theory of electric and magnetic phenomena]. – Moscow : USSR Academy of Sciences, 1948. – 836 p.

9. **Voldek, A. I.** Osnovi metodiki rascheta magnitnih polei lobovih obmotok elektricheskikh mashin [Fundamentals of the method of calculating magnetic fields of frontal windings of electric machines]. – Electricity, 1963, No. 1.

10. **Novozhilov, A. N., Volikova M. P.** Korrekciya tokov v metode zerkalnih otrajeniui pri modelirovanii magnitnih polei elektricheskikh mashin [Correction of currents in the method of mirror reflections in modeling magnetic fields of electric machines]. – Electricity, 2004, No. 9.

Материал поступил в редакцию 15.12.22.

**Е. Н. Колесников¹, А. Н. Новожилов², Д. М.*

Рахимбердинова³, Т. А. Новожилов⁴

^{1,2,3}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.

⁴Омбы Мемлекеттік Техникалық Университеті,

Ресей Федерациясы, Омбы қ.

Материал баспаға 15.12.22 түсті.

ЭҚМ ҚУАТ ТРАНСФОРМАТОРЫНЫҢ ӨЗЕКТЕРІНІҢ АРАСЫНДА ОРНАЛАСҚАН МТТ-НЫҢ ТҮНБАЛАРЫ

Электр энергетикасындағы ең маңызды құрылғылардың бірі-бір фазалы және үш фазалы қуат трансформаторлары. Сонымен қатар, қуат пен кернеу класына қарамастан, олардағы ең сенімсіз элементтердің бірі - орамалар, ал орамалардың жиі кездесетін электрлік зақымдануы-айналмалы тұйықталу. Дегенмен, ток трансформаторларында дәстүрлі түрде қолданылатын трансформаторлық қорғаныстар бұрылыс тұйықталуларына төмен сезімталдыққа ие.

Магниттік ток трансформаторларын (МТТ) қолдана отырып, үш фазалы үш орамалы трансформаторлардың қорғанысын әзірлеу

және іске асыру үшін осы катушкалардың магниттік шашырау өрістерінің кеңістікте таралуы туралы ақпарат болуы керек. Доңгелек итанғаның айналасындағы шашыраудың магнит өрістерін модельдеу әдістері белгілі. Алайда, қорғауды жүзеге асыруда МТТ-ның болжамды орындарының бірі оның трансформатордың өзектері арасында орналасуы болып табылады. Мақалада осы жерде орналасқан МТТ орамасында индукцияланған ЭҚК мәнін есептеу әдісі ұсынылған.

Шашыраудың магнит өрісін модельдеу тор әдісімен (ақырлы айырмашылықтар) ұсынылады. Ол үшін есептелген аймақ h қадамымен тікбұрышты торға бөлінеді. яғни үздіксіз аргумент аймағы нүктелердің ақырлы жиынымен ауыстырылады. Осылайша, әдіс Пуассон теңдеуінің туындыларының орнына дифференциалдық жуықтауларды қарастырады. Магниттік потенциалды сандық түрде анықтау дербес компьютерлердің (ДК) көмегімен Итерация әдісі бойынша жүзеге асырылады

Кілтті сөздер: үш орамалы трансформатор, магнит өрісін модельдеу, трансформатор орамдары, МТТ электр қозғаушы күші, тор әдісі.

*E. N. Kolesnikov¹, A. N. Novozhilov², D. M. Rakhimberdinova³, T. A. Novozhilov⁴

^{1,2,3}Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar

⁴Omsk State Technical University, Russian Federation, Omsk

Material received on 15.12.22

SIMULATION OF THE EMF OF A MCT LOCATED BETWEEN THE RODS OF THE CORE OF A POWER TRANSFORMER

One of the most important devices in the electric power industry are single-phase and three-phase power transformers. At the same time, one of the most unreliable elements in them, regardless of power and voltage class, are windings, and the most common electrical damage to the windings is a winding circuit. However, traditionally used transformer protections on current transformers have a low sensitivity to winding circuits.

To develop and implement protections for three-phase three-winding transformers using magnetic current transformers (MTT), it is necessary to have information about the distribution of the magnetic fields of scattering of these coils in space. Methods of modeling magnetic scattering fields around a round rod are known. However, one of the proposed locations of the MTT when implementing protection is its location strictly between the

transformer rods. The article proposes a method for calculating the effective value of the EMF induced in the MTT winding located at this location.

Modeling of the scattering magnetic field is proposed to be carried out using the method of grids (finite differences). To do this, the calculated area is divided into a rectangular grid with a step h . That is, the area of the continuous argument is replaced by a finite set of points. Thus, the method considers difference approximations instead of derivatives of the Poisson equation. The magnetic potential is determined numerically by the iteration method using personal computers (PCs)

Keywords: three-winding transformer; modeling of magnetic fields, transformer windings, electromotive force MCT, grid method.

Теруге 15.12.2022 ж. жіберілді. Басуға 30.12.2022 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

3,44 Мб RAM

Шартты баспа табағы 23.59. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 4019

Сдано в набор 15.12.2022 г. Подписано в печать 30.12.2022 г.

Электронное издание

3,44 Мб RAM

Усл. печ. л. 23.59. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. К. Мыржикова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4019

«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