

Моделирование ЭДС магнитных трансформаторов тока для токовой защиты трехфазного силового трансформатора

¹*КОЛЕСНИКОВ Евгений Николаевич, PhD, постдокторант, jeka89_pvl@mail.ru,
¹НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, д.т.н., профессор, novozhilova_on@mail.ru,
¹РАХИМБЕРДИНОВА Дилара Муратовна, PhD, постдокторант, Di_lara83@mail.ru,
²НОВОЖИЛОВ Тимофей Александрович, к.т.н., доцент, timokvey@mail.ru,
¹ИСЕНОВ Жанат Сансызбаевич, докторант, issenov.zh@gmail.com,
¹НАО «Торайгыров университет», Казахстан, Павлодар, ул. Ломова, 64,
²Омский государственный технический университет, Россия, Омск, пр. Мира, 11,
 *автор-корреспондент.

Аннотация. Одним из наиболее часто встречающихся повреждений обмоток трехфазных трансформаторов являются витковые замыкания. Традиционные токовые защиты имеют низкую чувствительность к ним, а газовые защиты не способны защитить «сухие» трансформаторы. Этим недостатком лишены нетрадиционные защиты на магнитных трансформаторах тока. Однако реализация таких защит невозможна без расчета ЭДС МТТ в произвольном режиме работы трансформатора, величина которых определена величиной аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния катушек трансформатора. Их математическое моделирование представляет сложную задачу и не позволяет учесть нелинейность этого трансформатора. Этого можно избежать, если для моделирования этой аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния обмоток трансформатора воспользоваться программным комплексом ELCUT. На основе его использования предложен метод моделирования действующего значения ЭДС, индуцируемых в обмотках МТТ, расположенных в местах, предлагаемых в рассматриваемом устройстве защиты линейного трехфазного трансформатора с помощью программного комплекса ELCUT. Дана оценка адекватности результатов моделирования магнитных полей рассеяния обмоток трансформатора путем сопоставления измеренной и рассчитанной ЭДС МТТ. Приведены рекомендации по учету нелинейности этого трансформатора.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, обмотки трансформатора, магнитный трансформатор тока, моделирование магнитных полей и ЭДС магнитного трансформатора тока, программный комплекс ELCUT.

Введение

В электроэнергетических системах для преобразования одного класса напряжения в другой применяются силовые трансформаторы. Одним из наиболее часто встречающихся повреждений их обмоток являются витковые замыкания (ВЗ) [1, 2]. В настоящее время для защиты от них используют традиционные дифференциальные и газовые защиты [3, 4], а также нетрадиционные токовые защиты на магнитных трансформаторах тока (МТТ) [5, 6].

В соответствии с [3, 4] дифференциальные защиты обладают низкой чувствительностью к ВЗ. Поэтому обычно не способны отключить трансформатор в начальный момент возникновения повреждения. Газовые защиты, по принципу действия нельзя использовать на «сухих» трансфор-

маторах. К тому же время срабатывания газовых защит при ВЗ сильно зависит от температуры масла на момент аварии, и числа замкнувшихся витков. При этом оно может составлять 0,1-1,0 с. За это время величина повреждения трансформатора может достигнуть таких размеров, когда стоимость его ремонта станет сопоставимой со стоимостью нового трансформатора.

Метод моделирования ЭДС МТТ

Высокой чувствительностью и быстродействием обладает нетрадиционная защита на МТТ [5, 6]. Она способна защитить трансформатор от замыкания нескольких витков обмотки и отключить его при возникновении ВЗ в течение 0,04-0,08 с. Размещение МТТ защиты относительно элементов трехфазного трансформатора [5], а также раз-

меры этих элементов приведены на рисунке 1, где 1 – ферромагнитный сердечник трансформатора; 2 – стержень этого сердечника; 3 – катушки трансформатора; 4 и 5 – МТТ защиты. При таком размещении МТТ фазы их ЭДС будут сдвинуты на 180 градусов, а величины пропорциональны числу витков в этих МТТ. Поэтому при реализации такой защиты числа их витков выбираются такими, чтобы величины ЭДС этих МТТ в эксплуатационных режимах работы трансформатора были равны между собой.

Таким образом, реализация этих защит невозможна без расчета ЭДС МТТ в произвольном режиме работы трансформатора, величина которых определена величиной аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния катушек трансформатора. Как известно [7-9], ее математическое моделирование представляет сложную задачу и не позволяет учесть нелинейность этого трансформатора. Этого можно избежать, если для моделирования аксиальной составляющей магнитного поля рассеяния обмоток трансформатора воспользоваться программным комплексом ELCUT [10].

Процесс моделирования магнитных полей с помощью ELCUT состоит из нескольких этапов.

На первом этапе формируется задача, где определяется ее тип, единицы измерения объекта исследования и система координат. Для этого используется диалоговое окно формирования задачи. В данном случае в диалоговом окне в качестве типа задачи выбирается раздел «Магнитное поле переменных токов», в качестве единиц измерения «Миллиметры», а в качестве координат выбирается «Декартовы» координаты. После чего в рамках созданной задачи строится геометрическая модель объекта исследования. Для этого в качестве примера используется схема расположения элементов экспериментального трансформатора ТТ-6 мощностью 6 кВт, приведенная на рисунке 1, параметры которых представлены в таблице.

Вид построенной геометрической модели объекта исследования в виде трехфазного трансформатора приведен на рисунке 2. Для ее построения с помощью «мыши» компьютера задается положение вершин геометрической модели, которые на этом рисунке помечены точками. Затем эти точки объединяются линиями – ребрами. В свою очередь ребра образуют замкнутый контур – блок. Подобным образом на рисунке 2 созданы блоки магнитопровода, обмоток и окружающей среды (воздуха). Всем этим блокам присваивают-

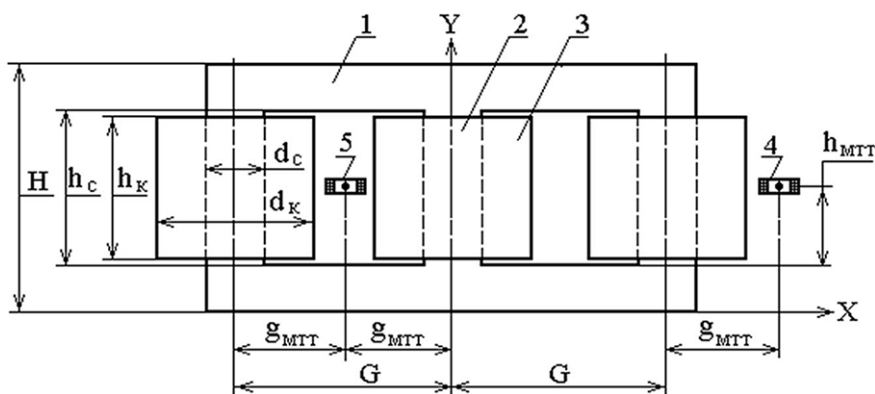


Рисунок 1 – Схема взаимного расположения элементов трансформатора и МТТ

Параметры элементов экспериментального трансформатора ТТ-6	
Параметры элементов трансформатора ТТ-6	Величина
Высота магнитопровода H , м	260
Расстояние между стержнями магнитопровода G , мм	126
Диаметр стержня магнитопровода d_c , мм	62
Длина стержня магнитопровода h_c , мм	138
Диаметр катушки d_k , мм	110
Длина катушки h_k , мм	132
Число витков в первичной/вторичной обмотке w_1/w_2 , вит	252/31
Величина тока в первичной/вторичной обмотке в режиме номинальной нагрузки I_1/I_2 , А	9,11/7,11
Величина тока в первичной/вторичной обмотке в режиме холостого хода I_1/I_2 , А	0,127/0
Расстояние от оси стержня магнитопровода до МТТ $g_{МТТ}$, мм	63

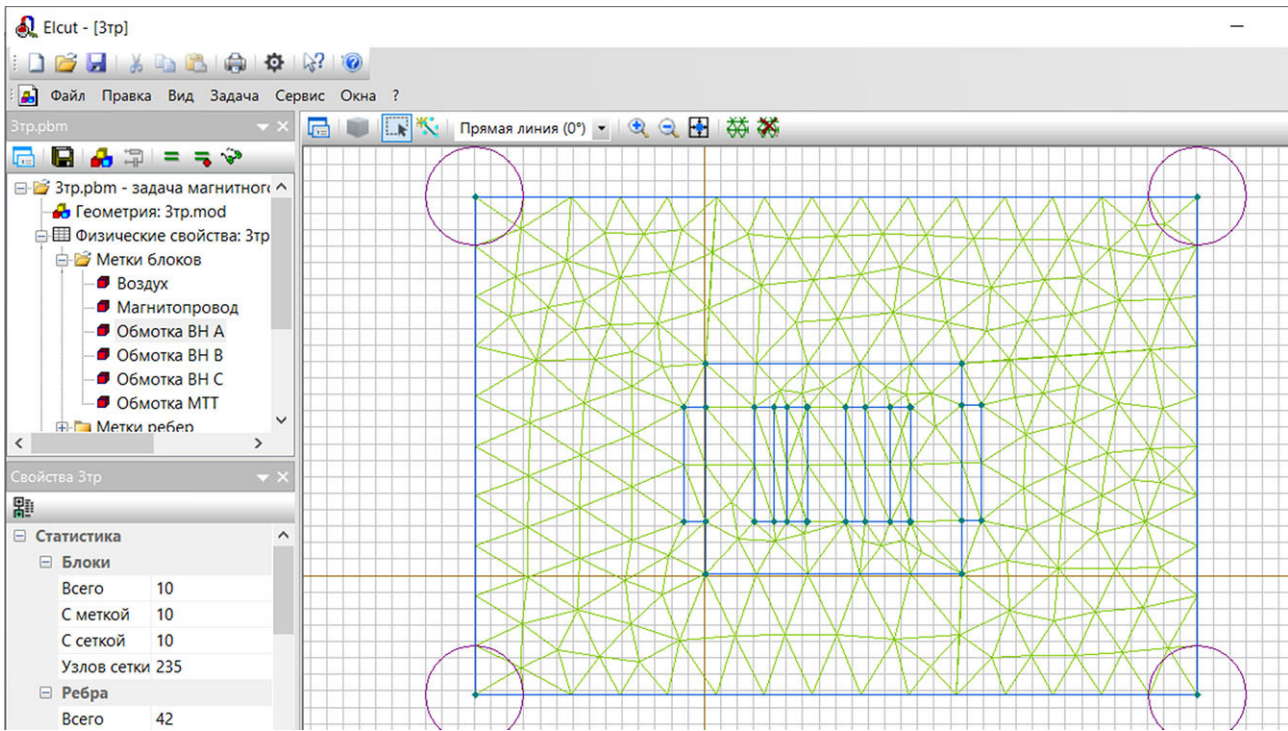


Рисунок 2 – Окно геометрической модели объекта трехфазного трансформатора с сеткой для реализации метода конечных элементов

ся соответствующие метки. В окне свойств меток блока задается магнитная проницаемость материала и параметры источника поля в виде плотности тока.

Если трансформатор не насыщен, то в этом случае магнитная проницаемость его сердечника принимается неизменной и равной бесконечности.

Источником магнитного поля в геометрической модели объекта являются обмотки катушек с током. Если допустить, что плотность токов по сечению катушки распределена равномерно, то в этом случае, например, для двухобмоточного трансформатора плотность тока в катушках [11] можно рассчитать как

$$j_k = \frac{(\bar{I}_1 w_1 + \bar{I}_2 w_2)}{\left(\frac{d_k}{2} - \frac{d_c}{2}\right) h_k}. \quad (1)$$

Определение плотности тока в блоках катушек фаз для произвольного момента времени осуществляется с учетом того, что токи фаз представляют собой трехфазную симметричную систему.

В связи с тем, что для объекта исследования моделируется магнитное поле, то на границах расчетной области используются граничные условия Дирихле [11]. По этим условиям векторный магнитный потенциал на этих границах расчетной зоны равен нулю. Это его значение задается с помощью диалогового окна свойств меток вершин. Далее с помощью кнопки этого окна «Построение сетки» осуществляется построение сетки конечных элементов. В результате операций окно

с построенной геометрической моделью принимает вид, показанный на рисунке 2. При этом автоматически осуществляется решение задачи. Программный комплекс ELCUT позволяет увидеть решение задачи в виде картины магнитного поля или локальных полевых значений. Представление результатов решения поставленной задачи с результатами в виде картины магнитного поля приведено на рисунке 3.

В соответствии с [11] связь между ЭДС в обмотке МТТ и индукцией магнитного поля рассеяния трансформатора можно описать математическим выражением

$$E_{\text{МТТ}} = 4,44 B_y f_c w_{\text{МТТ}} Q_{\text{МТТ}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{МТТ}}$ – действующее значение ЭДС измерительной катушки; B_y – действующее значение аксиальной составляющей индукции магнитного поля рассеяния катушек трансформатора; f_c – частота тока в сети; $w_{\text{МТТ}}$ и $Q_{\text{МТТ}}$ – число витков и площадь витка измерительной катушки.

В связи с этим оценка адекватности результатов моделирования магнитных полей рассеяния обмоток трансформатора осуществлялась путем сопоставления измеренной и рассчитанной ЭДС МТТ. При проведении экспериментов в качестве МТТ использовалась катушка от промежуточного реле РП-11 [12, 13] с $w_{\text{МТТ}} = 12500$ витков при среднем размере площади витка $Q_{\text{МТТ}} = 330 \text{ мм}^2$.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования и эксперимента ЭДС ЭМТТ наведенной аксиальной составляю-

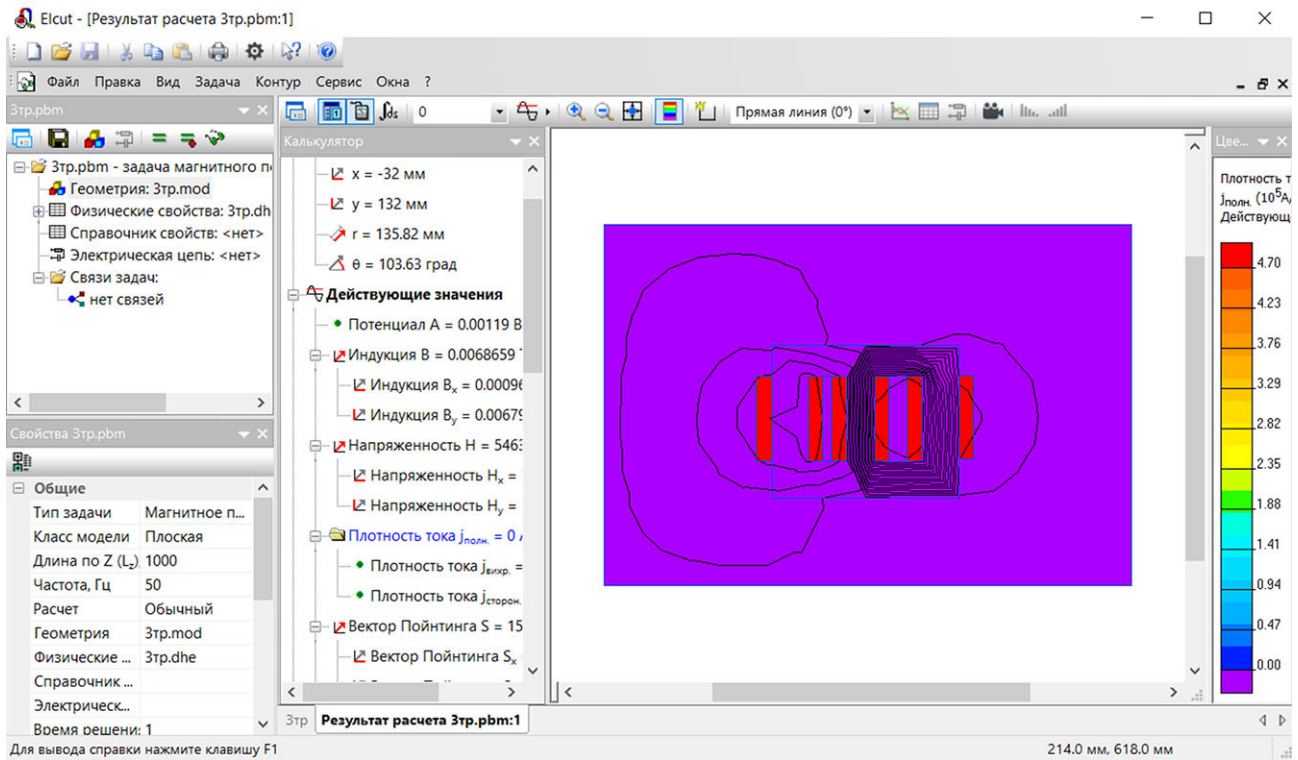


Рисунок 3 – Окно для представления результатов моделирования магнитного поля рассеяния обмоток трехфазного трансформатора

щей индукции магнитного поля рассеяния катушек трансформатора, работающего в режиме нагрузки, приведены на рисунке 4, где линиями 1 и 2 показаны зависимости $E_{МТТ} = f(y)$, полученные расчетным путем для МТТ 4 и 5, а точками 3 и 4 – результаты эксперимента для этих МТТ.

Сопоставление результатов расчета и эксперимента на рисунке 4 показывает, что погрешность моделирования аксиальной составляющей магнитных полей рассеяния катушек трансформатора с помощью программного комплекса ELCUT не превышает 10%. Такая погрешность моделирования вполне удовлетворяет требованиям релейной защиты.

В соответствии с рисунком 4, если МТТ 4 и 5 имеют одинаковое число витков и размещаются на расстоянии $g_{МТТ}$ от оси катушки, то в этом случае в них будут наводиться ЭДС, разные по величине. Так как при реализации защиты эти ЭДС должны быть одинаковыми, то в этом случае следует в одном из МТТ изменить количество витков. Если при реализации защиты использовать МТТ с одинаковым количеством витков, то в этом случае следует уменьшить расстояние между осью катушки трансформатора и МТТ 4.

Как известно [11], трансформаторы с ферромагнитным сердечником нелинейны. В тех случаях, когда требуется учесть эту нелинейность, при использовании программного комплекса ELCUT в окне геометрической модели объекта дополнительно открывают окно «Задание физических

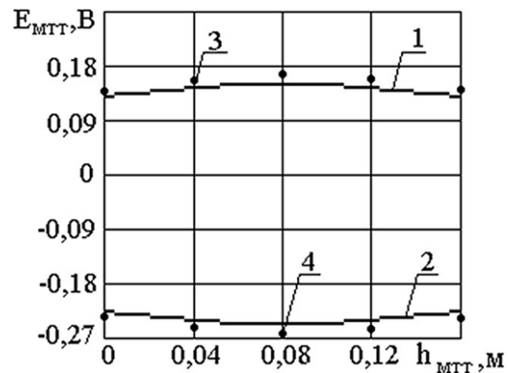


Рисунок 4 – Результаты моделирования и эксперимента ЭДС МТТ

свойств метки блока магнитопровода». Вид этого окна показан на рисунке 5. Затем в этом окне задаются параметры кривой намагничивания магнитопровода трансформатора так, как это показано на рисунке 6.

Выводы

1. Достаточно просто ЭДС МТТ для токовой защиты как линейного, так и нелинейного трехфазного силового трансформатора определяются с помощью программного комплекса ELCUT.
2. Погрешность моделирования ЭДС МТТ для токовой защиты с помощью программного комплекса ELCUT не превышает 10%.

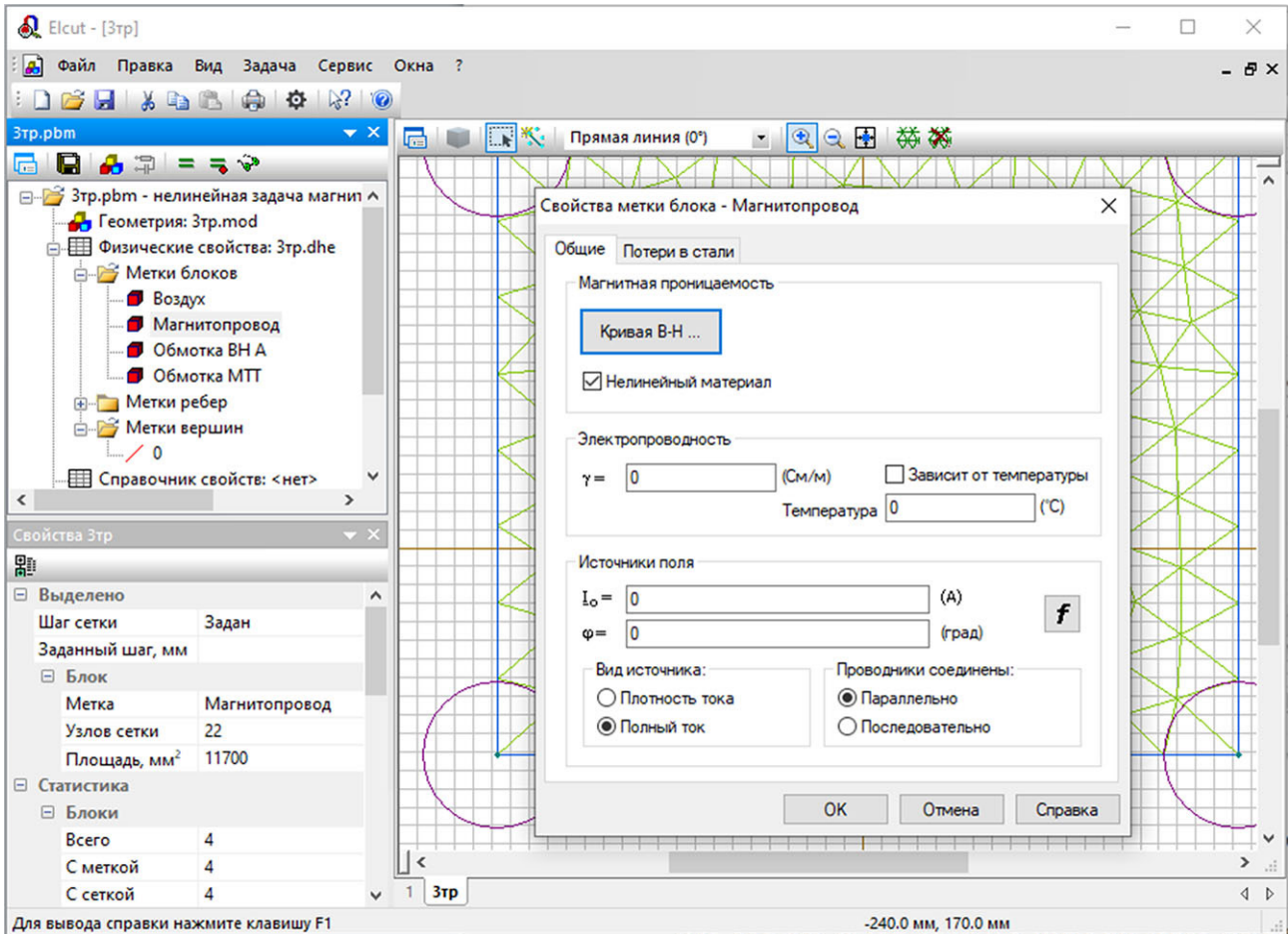


Рисунок 5 – Задание физических свойств метки блока магнитопровода

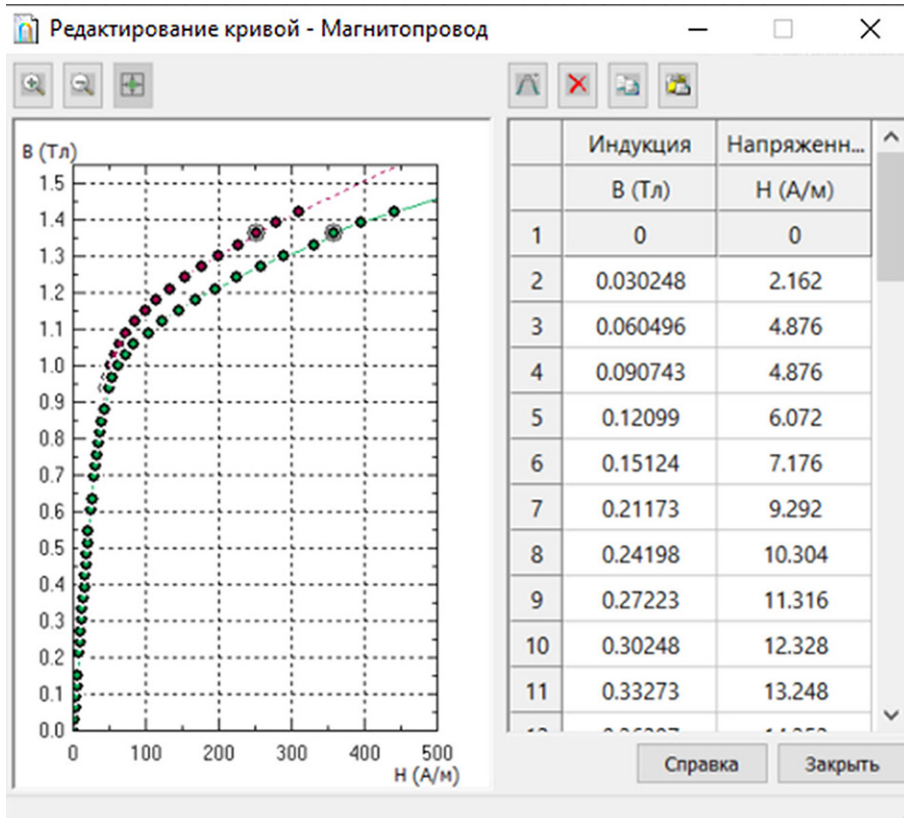


Рисунок 6 – Кривая намагничивания магнитопровода стержня трансформатора

Этo исследование было профинансировано Министерством науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP14972779).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаген А.Ф., Пястолов А.А. Релейная защита трансформаторов от витковых замыканий // Электричество. – 1984. – № 2. С. 70-72.
2. Засыпкин, А.С. Релейная защита трансформаторов [Текст] / Засыпкин А.С. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
3. Беркович М.А. Основы техники релейных защит [Текст] / Беркович М.А., Молчанов В.В., Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
4. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 1991. – 496 с.: ил.
5. 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.
6. Новожилов Т.А. Защита однофазного трансформатора от электрических и механических повреждений на магнитном трансформаторе тока [Текст] / Т.А. Новожилов // Электричество. – 2017. – № 6. – С. 65-70.
7. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений [Текст] / Гринберг Г.А. – М.: АН СССР, 1948. – 836 с.
8. Туровский Я. Электромагнитные расчеты элементов электрических машин [Текст] / Туровский Я. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 201 с.
9. 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. – Pp. 710-714.
10. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.5. Руководство пользователя. [Электронный ресурс] / ООО «Тор». – Санкт-Петербург, 2021. URL: https://elcut.ru/downloads/manual_r.pdf.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1967. – 775 с.
12. Алексеев В.С. Реле защиты [Текст] / Алексеев В.С., Варганов Б.И., Панфилов Б.И., Розенблюм Р.З. – Л.: Энергия, 1976. – 464 с.
13. Какучевицкий Л.И., Смирнова Т.В. Справочник реле защиты и автоматики. – М.: Энергия, 1972. – 344 с.

Үш фазалы қуат трансформаторын токтан қорғау үшін ЭҚК магниттік ток трансформаторларын модельдеу

¹*КОЛЕСНИКОВ Евгений Николаевич, PhD, постдокторант, jeka89_pvl@mail.ru,

¹НОВОЖИЛОВ Александр Николаевич, т.ғ.д., профессор, novozhilova_on@mail.ru,

¹РАХИМБЕРДИНОВА Дилара Мұратқызы, PhD, постдокторант, Di_lara83@mail.ru,

²НОВОЖИЛОВ Тимофей Александрович, т.ғ.к., доцент, timokvey@mail.ru,

¹ИСЕНОВ Жанат Сансызбайұлы, докторант, issenov.zh@gmail.com,

¹«Торайғыров университеті» КеАҚ, Қазақстан, Павлодар, Ломов көшесі, 64,

²Омбы мемлекеттік техникалық университеті, Ресей, Омбы, Мира даңғылы, 11,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Үш фазалы трансформаторлардың орамаларына жиі кездесетін зақымдардың бірі-айналмалы түйықталу. Дәстүрлі ток қорғанысы оларға төмен сезімталдыққа ие, ал газ қорғанысы «құрғақ» трансформаторларды қорғай алмайды. Бұл кемшіліктер магниттік ток трансформаторларындағы дәстүрлі емес қорғаныстардан айырылған. Алайда, мұндай қорғаныстарды трансформатор катушкаларының шашырауының магнит өрісінің осьтік компонентінің шамасымен анықталатын трансформатордың ерікті жұмыс режимінде МТТ ЭҚК есептеусіз жүзеге асыру мүмкін емес. Олардың математикалық модельдеуі күрделі мәселе болып табылады және бұл трансформатордың сызықтық устігін ескеруге мүмкіндік бермейді. Егер трансформатор орамаларының шашырауының магнит өрісінің осьтік компонентін модельдеу үшін ELCUT бағдарламалық кешенін пайдалансаңыз, мұны болдырмауға болады. Оны пайдалану негізінде elcut бағдарламалық кешенінің көмегімен сызықтық үш фазалы трансформаторды қорғау құрылғысында ұсынылған жерлерде орналасқан МТТ орамаларында индукцияланатын ЭМӨ-нің қолданыстағы мәнін модельдеу әдісі ұсынылды. Өлшенген және есептелген МТТ ЭҚК салыстыру арқылы трансформатор орамаларының шашырауының магнит өрістерін модельдеу нәтижелерінің барабарлығына баға берілді. Бұл трансформатордың сызықты емесігін ескеру бойынша ұсыныстар берілген.

Кілт сөздер: үш фазалы трансформатор, трансформатор орамдары, магниттік ток трансформаторы, магнит өрістерін модельдеу және магниттік ток трансформаторының ЭҚК, ELCUT бағдарламалық кешені.

Simulation of EMF of Magnetic Current Transformers for Current Protection of a Three-phase Power Transformer¹*KOLESNIKOV Evgeniy, PhD, Postdoctoral Student, jeka89_pvl@mail.ru,¹NOVOZHILOV Alexander, Dr. of Tech. Sci., Professor, novozhilova_on@mail.ru,¹RAKHIMBERDINOVA Dilara, PhD, Postdoctoral Student, Di_lara83@mail.ru,²NOVOZHILOV Timofey, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, timokvey@mail.ru,¹ISENOV Janat, Doctoral Student, issenov.zh@gmail.com,¹NCJSC «Toraighyrov University», Kazakhstan, Pavlodar, Lomov Street, 64,²Omsk State Technical University, Russia, Omsk, Mira Avenue, 11,

*corresponding author.

Abstract. One of the most common damage to the windings of three-phase transformers are loop closures. Traditional current protections have low sensitivity to them, and gas protections are not able to protect «dry» transformers. Unconventional protections on magnetic current transformers are devoid of these disadvantages. However, the implementation of such protections is impossible without calculating the MTT EMF in an arbitrary transformer operation mode, the magnitude of which is determined by the magnitude of the axial component of the magnetic field scattering of the transformer coils. Their mathematical modeling is a difficult task and does not allow taking into account the nonlinearity of this transformer. This can be avoided if the ELCUT software package is used to simulate this axial component of the magnetic scattering field of the transformer windings. Based on its use, a method is proposed for modeling the effective value of the EMF induced in the MTT windings located in the places proposed in the considered protection device of a linear three-phase transformer using the ELCUT software package. The adequacy of the results of modeling the magnetic fields of scattering of transformer windings is assessed by comparing the measured and calculated MTT EMF. Recommendations for taking into account the nonlinearity of this transformer are given.

Keywords: three-phase transformer, transformer windings, magnetic current transformer, modeling of magnetic fields and EMF of a magnetic current transformer, ELCUT software package.

REFERENCES

1. Gagen A.F., Pjastolov A.A. Relejnaja zashhita transformatorov ot vitkovykh zamykanij // *Jelektrichestvo*. – 1984. – No. 2. Pp. 70-72.
2. Zasypkina, A.S. Relejnaja zashhita transformatorov [Tekst] / Zasypkina A.S. – Moscow: Jenergoatomizdat Publ, 1989. – 240 p.
3. Berkovich M.A. Osnovy tehniki relejnykh zashhit [Tekst] / Berkovich M.A., Molchanov V.V., Semenov V.A. – Moscow: Jenergoatomizdat Publ, 1984. – 232 p.
4. Andreev V.A. Relejnaja zashhita i avtomatika sistem jelektronsnabzhenija. Moskva: Vysshaja shkola, 1991. – 496 p.: il.
5. Innov. pat. No. 26738 RK. MPK N02N 7/04. Ustrojstvo zashhity trehfaznogo transformatora ot zamykanij obmotok / Novozhilov A.N., Novozhilov T.A., Kolesnikov E.N. i dr.; opubl. 15.03.13, Bjul. No. 3. – 3 p.
6. Novozhilov T.A. Zashhita odnofaznogo transformatora ot jelektricheskikh i mehanicheskikh povrezhdenij na magnitnom transformatore toka [Tekst] / T.A. Novozhilov // *Jelektrichestvo*. – 2017. – No. 6. – Pp. 65-70.
7. Grinberg G.A. Izbrannye voprosy matematicheskoj teorii jelektricheskikh i magnitnykh javlenij [Tekst] / Grinberg G.A. – Moscow: AN SSSR, 1948. – 836 p.
8. Turovskij Ja. Jelektrromagnitnye raschety jelementov jelektricheskikh mashin [Tekst] / Turovskij Ja. – Moscow: Jenergoatomizdat Publ, 1986. – 201 p.
9. 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. – Pp. 710-714.
10. ELCUT. Modelirovanie jelektrromagnitnykh, teplovykh i uprugih polej metodom konechnykh jelementov. Versija 6.5. Rukovodstvo pol'zovatelja. [Jelektronnyj resurs] / OOO «Tor». – Saint Petersburg, 2021. URL: https://elcut.ru/downloads/manual_r.pdf.
11. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy jelektrrotehniki. – Moscow: Vysshaja shkola, 1967. – 775 p.
12. Alekseev V.S. Rele zashhity [Tekst] / Alekseev V.S., Varganov B.I., Panfilov B.I., Rozenbljum R.Z. – Leningrad: Jenergija Publ, 1976. – 464 p.
13. Kakuevickij L.I., Smirnova T.V. Spravochnik rele zashhity i avtomatiki. – Moscow: Jenergija Publ, 1972. – 344 p.