



Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах

© Т.С. Мухаметгалева, Д.С. Федосов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью работы является создание упрощенной модели трансформатора тока на основе данных его вольтамперной характеристики. Данная модель применима для исследования работы релейной защиты в переходных режимах, когда не требуется высокой точности, в том числе учета гистерезиса магнитопровода трансформатора тока. Модель разработана в среде MATLAB Simulink с применением элементов библиотек SimPowerSystems и Simscape. В модели используются данные о коэффициенте трансформации и вольтамперной характеристике, снятой при эксплуатационных испытаниях трансформатора тока. В ходе расчетных экспериментов на нелинейном сопротивлении установлено, что для моделирования трансформатора тока можно использовать вольтамперную характеристику не в мгновенных, а в действующих значениях тока и напряжения. Смоделированы режимы с номинальными токами в обмотках трансформатора тока для проверки коэффициента трансформации, режимы с разомкнутой вторичной обмоткой и режимы с насыщением трансформатора тока за счет увеличения вторичной нагрузки, повышения кратности первичного тока и наличия аperiodического тока в начальный момент переходного процесса. Установлено, что модель трансформатора тока позволяет корректно имитировать все указанные режимы. Для верификации модели выполнено снятие осциллограмм вторичного тока на реальных трансформаторах тока 10 кВ при известном первичном токе и их сравнение с расчетными осциллограммами на модели. Расхождение между результатами расчетного и натурального экспериментов составило не более 10% в амплитудных значениях, при этом получено качественное совпадение графиков токов на модели и у реального трансформатора тока. Основным преимуществом разработанной модели является то, что для ее задания не требуется информация о сечении магнитопровода, длине силовой линии, марке стали и числах витков обмоток трансформатора тока.

Ключевые слова: релейная защита, трансформатор тока, вольтамперная характеристика, насыщение трансформатора тока, MATLAB Simulink, моделирование

Для цитирования: Мухаметгалева Т.С., Федосов Д.С. Разработка упрощенной модели трансформатора тока для исследования работы релейной защиты в переходных режимах. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2021. Т. 25. № 4. С. 450–462. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-450-462>

A simplified model of a current transformer for studying relay protection operation in transient conditions

Tatiana S. Mukhametgaleeva, Denis S. Fedosov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: We develop a simplified model of a current transformer based on its current-voltage characteristic. This model is applicable for studying relay protection operation in transient conditions when no high accuracy or consideration of current transformer magnet core hysteresis is required. The model was developed in MATLAB Simulink using elements of the SimPowerSystems and Simscape libraries. The model uses the transformation ratio and current-voltage characteristic obtained during operational tests of a current transformer. Calculation experiments with non-linear resistance found that a current-voltage characteristic of voltage and current values can be used to model a current transformer, rather than instantaneous values. The following conditions were simulated: for nominal currents in current transformer windings to check the transformation ratio; for opened secondary winding; with current transformer saturation by increasing secondary loading; increasing the primary current ratio and presence of aperiodic current at the start of the transition process. It was found that the developed current transformer model allows for a correct imitation of all the above conditions. To verify the model, secondary current oscillograms were obtained using real current transformers 10 kV at known primary current, which were compared with nominal oscillograms in the model. The discrepancy between the results of calculational and real experiments was no more than 10% in amplitude values, with high-quality matching obtained for current charts in the model and real current transformers. A significant advantage of the developed model is that its setting requires no information on magnet core cross-section, power line length, steel grade, and the number of current transformer winding turns.

Keywords: relay protection, current transformer, current-voltage characteristic, saturation of current transformer, MATLAB Simulink, simulation

For citation: Mukhametgaleeva TS, Fedosov DS. A simplified model of a current transformer for studying relay protection operation in transient conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(4):450–462. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-4-450-462>

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом мощность электрооборудования энергосистем увеличивается, при этом неизбежно возрастает количество повреждений и далеких от нормы режимов работы [1]. По этой причине при реконструкции и модернизации объектов энергетики повышаются требования к устройствам релейной защиты (РЗ) от коротких замыканий (КЗ) и других видов повреждений.

Основными требованиями к работе устройств РЗ являются селективность, надежность, чувствительность и быстродействие [2]. Они должны обеспечиваться не только самими устройствами РЗ, но и первичными преобразователями измеряемых величин, в первую очередь трансформаторами тока (ТТ). Именно от аналогового сигнала ТТ во многом зависит правильная работа РЗ. Вторичный ток электромагнитных ТТ в переходных режимах может значительно искажаться по причине насыщения магнитной системы ТТ [3]. Такая проблема является актуальной как для работы аналоговых (электромеханических и статических), так и цифровых защит [3–5]. Известен случай неправильной работы РЗ в 2014 г. на одной из электростанций из-за искажения вторичного тока по причине насыщения ТТ при внешнем трехфазном КЗ с апериодической составляющей. Некорректное срабатывание защиты привело к развитию крупной системной аварии. Подобные случаи отмечаются и в зарубежных публикациях [6–8].

Для предотвращения подобных аварий в энергосистемах необходима разработка мероприятий по повышению надежности работы РЗ. Требуется корректно рассчитывать вторичные токи ТТ в переходных режимах, для чего нужна адекватная математическая модель ТТ. Существующие модели ТТ [9–11]

требуют наличия информации о параметрах обмоток ТТ (число витков, сопротивления обмоток) и магнитной цепи ТТ (длина средней силовой линии, сечение магнитопровода, характеристика намагничивания стали), которая не сообщается производителями в технической документации и в лучшем случае доступна только по частному запросу. Вместе с тем для исследования работы РЗ не требуется высокая точность моделирования ТТ. Например, в [12] указано, что для моделирования можно применять близкую к прямоугольной характеристику намагничивания, а явление гистерезиса для ТТ, применяемых в РЗ, можно не учитывать, придерживаясь РД 153-34.0-35.301-02¹.

В связи с этим актуальной задачей является разработка упрощенной модели ТТ для распространенной среды моделирования MATLAB Simulink [13, 14]. В качестве источника информации для моделирования предлагается использовать вольтамперную характеристику (ВАХ), снятую при периодической проверке ТТ, и данные о коэффициенте трансформации. Построение модели только на основе ВАХ позволит исключить необходимость получения информации о ТТ, которая не указана в его паспортных данных. Такая модель ТТ с использованием ВАХ и дифференциальных уравнений будет использоваться для расчетного исследования погрешностей трансформаторов тока и изучения их влияния на работу устройств РЗ в переходных режимах. Для проверки корректности разработанной модели ТТ предлагается провести моделирование установившихся режимов и переходных процессов с апериодической составляющей тока и сравнить результаты моделирования с натурными осциллограммами реальных ТТ.

¹РД 153-34.0-35.301-02. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты и измерения. Введ. 01.03.2003. М., 2003. 151 с.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Известна модель ТТ на основе дифференциальных уравнений [10, 15]:

$$\begin{cases} w_2 S_c \frac{dB}{dt} = (R_2 + R_n) i_2 + (L_2 + L_n) \frac{di_2}{dt}; \\ i_1 w_1 - i_2 w_2 = H l_{cp}; \\ B = f(H), \end{cases} \quad (1)$$

где w_1 , w_2 – число витков первичной и вторичной обмоток ТТ; i_1 , i_2 – токи в первичной и вторичной обмотках ТТ; R_2 , L_2 – активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки ТТ; R_n , L_n – активное сопротивление и индуктивность вторичной нагрузки ТТ; l_{cp} – длина средней силовой линии магнитного поля в магнитопроводе ТТ; S_c – площадь поперечного сечения магнитопровода ТТ; $B = f(H)$ – средняя характеристика намагничивания электротехнической стали (зависимость индукции B от напряженности магнитного поля H при номинальной частоте $f = 50$ Гц) [16].

На кафедре электрических станций, сетей и систем Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) также разработана имитационная модель ТТ в среде MATLAB Simulink [17] с использованием дифференциальных уравнений. Уравнения описывают параметры режима в первичной и вторичной обмотках ТТ и формируются при помощи 2-го закона

Кирхгофа и уравнения магнитодвижущих сил ТТ.

Как упоминалось ранее, общим недостатком данных моделей является необходимость задавать информацию о сечении магнитопровода, длине силовой линии, марке стали и числе витков обмоток, что у большинства ТТ не указано в заводской документации и, безусловно, является избыточным для практических расчетов при анализе поведения РЗ.

Также на кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ разработана упрощенная модель ТТ с использованием блока Saturable Transformer в среде MATLAB Simulink [18]. Для данной модели в качестве исходных данных используется информация о коэффициенте трансформации, номинальной мощности ТТ и его ВАХ. Однако основной проблемой при применении такой модели является отсутствие информации об уравнениях, применяемых в блоке Saturable Transformer для моделирования кривой намагничивания ТТ.

Этими причинами и обусловлено создание новой упрощенной математической модели ТТ на основе ВАХ. Разработаны два типа моделей ТТ в MATLAB с применением разных библиотек элементов для моделирования.

Первая модель создана в среде MATLAB Simulink при помощи общих блоков Simulink и библиотеки SimPowerSystems [14, 16]. В качестве основы для построения модели используется Т-образная схема замещения ТТ на рис. 1 [19].

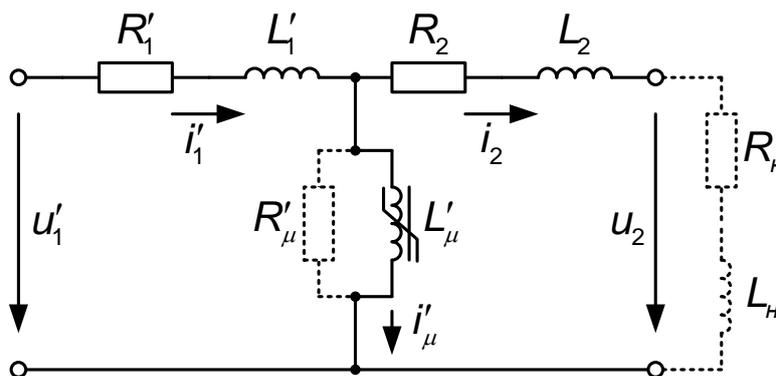


Рис. 1. Т-образная схема замещения трансформатора тока
Fig. 1. T-shaped equivalent circuit of a current transformer

В упрощенной модели ТТ принято, что сопротивления первичной и вторичной обмоток ТТ ввиду их малости равны нулю. Таким образом, объектом моделирования становится только ветвь намагничивания с нелинейной индуктивностью L_μ . По данной ветви протекает ток намагничивания i_μ , являющийся разностью приведенного первичного i_1' и вторичного i_2 токов ТТ. Сопротивление ветви намагничивания при синусоидальном токе намагничивания (работа на линейном участке ВАХ) может быть найдено по мгновенным значениям тока и напряжения, сдвинутым относительно друг друга на угол 90° :

$$X_\mu = \frac{u_2}{i_\mu} = \omega L_\mu, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота переменного тока. Поскольку в данной работе исследуется режим с насыщением магнитопровода, т.е. режим нелинейных электрических цепей, то выражение (2) нельзя применить для всей ВАХ. Вместе с тем электродвижущая сила (ЭДС) вторичной обмотки, численно равная при отсутствии сопротивления вторичной обмотки напряжению u_2 , описывается уравнением по закону электромагнитной индукции:

$$e_2 = u_2 = L_\mu \frac{di_\mu}{dt}, \quad (3)$$

где $L_\mu = \frac{u_2}{i_\mu \omega}$ – нелинейная индуктивность сердечника ТТ, определяемая ВАХ.

В разработанной модели с общими блоками Simulink и SimPowerSystems (рис. 2) первичный ток приводится ко вторичной обмотке с помощью деления на коэффициент трансформации ТТ блоком Gain. Затем приведенный первичный и вторичный токи вычитаются, чтобы получить ток намагничивания:

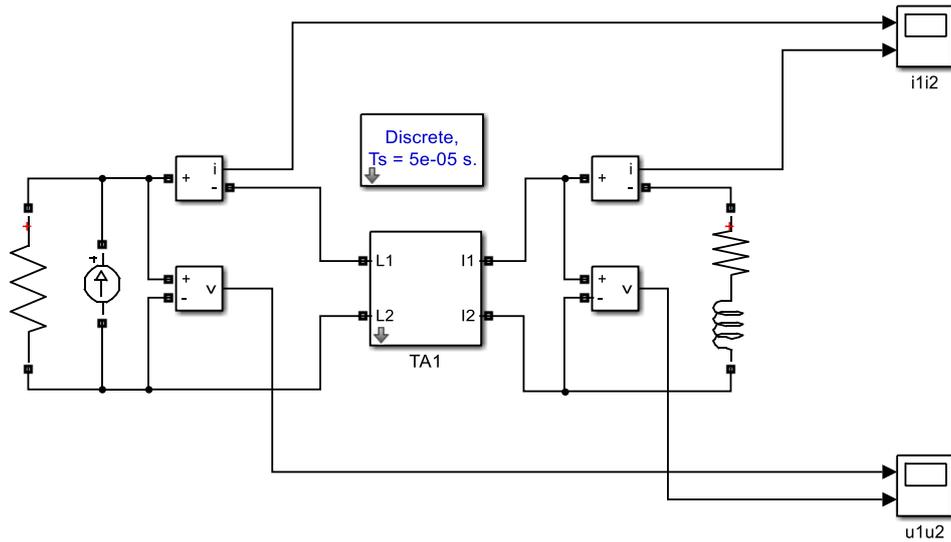
$$i_\mu = i_1' - i_2. \quad (4)$$

Для задания ВАХ используется блок Lookup Table. Из тока намагничивания i_μ на входе блок Lookup Table позволяет получить величину ЭДС ТТ (напряжения на вторичной обмотке u_2). Преобразование тока в напряжение ведется по заданной в блоке Lookup Table ВАХ в мгновенных значениях тока и напряжения. Так как по выражению (3) напряжение связано с током намагничивания через производную, после блока Lookup Table выполняется операция дифференцирования с помощью блока Derivative. Так как производная тока своей размерностью отличается от напряжения, для приведения величины производной в вольты выполняется деление сигнала на величину ω в блоке Gain. Полученное напряжение (электродвижущая сила ТТ) подается на управляемый источник напряжения Controlled Voltage Source, включенный во вторичную обмотку.

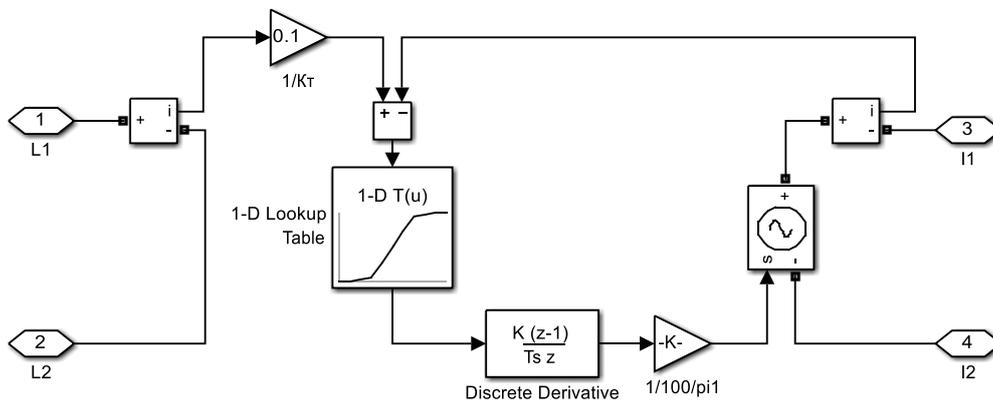
Вторая модель ТТ в среде MATLAB аналогична первой с тем отличием, что для построения используются блоки библиотеки Simscape (рис. 3). Для нахождения производной использована цепь с индуктивностью. Это вызвано отсутствием в среде Simscape штатного блока для нахождения производной сигнала. Блок PS-Simulink Converter необходим для перевода физического сигнала Simscape в сигнал для Simulink и его отображения.

Представляет отдельный интерес вопрос о корректности задания ВАХ в действующих значениях тока и напряжения (в соответствии с протоколом проверки ТТ) вместо ВАХ в мгновенных значениях, как этого требует выражение (3) для нахождения производной тока. Сравнение результатов снятия ВАХ в мгновенных и действующих значениях величин проведено на модели нелинейного сопротивления (рис. 4 а), которое задано зависимостью напряжения от тока в блоке Lookup Table.

В модели на рис. 4 б, где снимается ВАХ в мгновенных значениях тока и напряжения, в цепь с нелинейным сопротивлением включен блок управляемого источника тока, который позволяет регулировать значения подаваемого постоянного тока. В модели на рис. 4 с нелинейное сопротивление включено в



a



b

Рис. 2. Модель трансформатора тока (а), работающего на активно-индуктивную нагрузку, и подсистема с моделью трансформатора тока в среде MATLAB Simulink (b)
Fig. 2. Model of a current transformer with active and inductive loads (a) and a subsystem with a model of a current transformer in MATLAB Simulink environment (b)

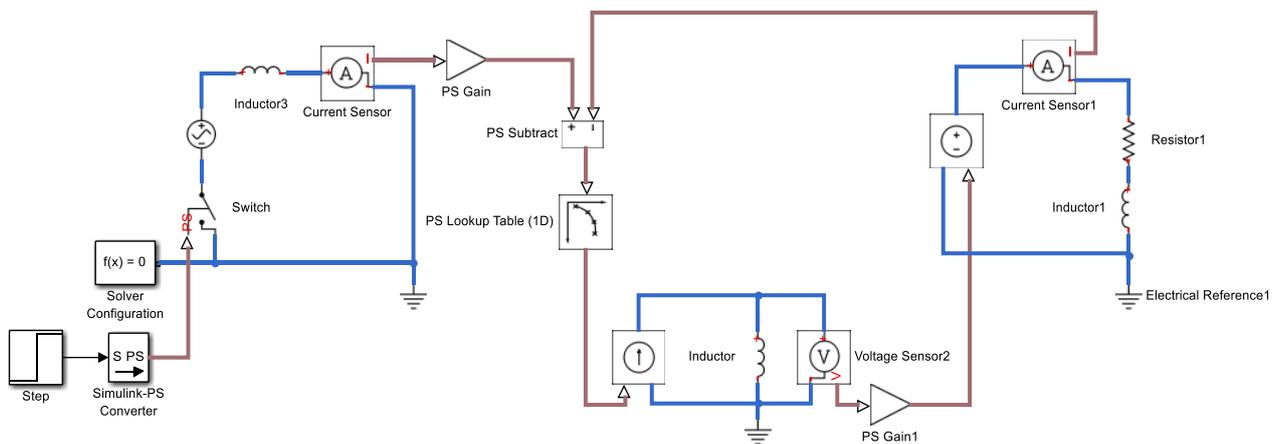


Рис. 3. Модель трансформатора тока в среде MATLAB Simscape
Fig. 3. Model of a current transformer in MATLAB Simscape environment

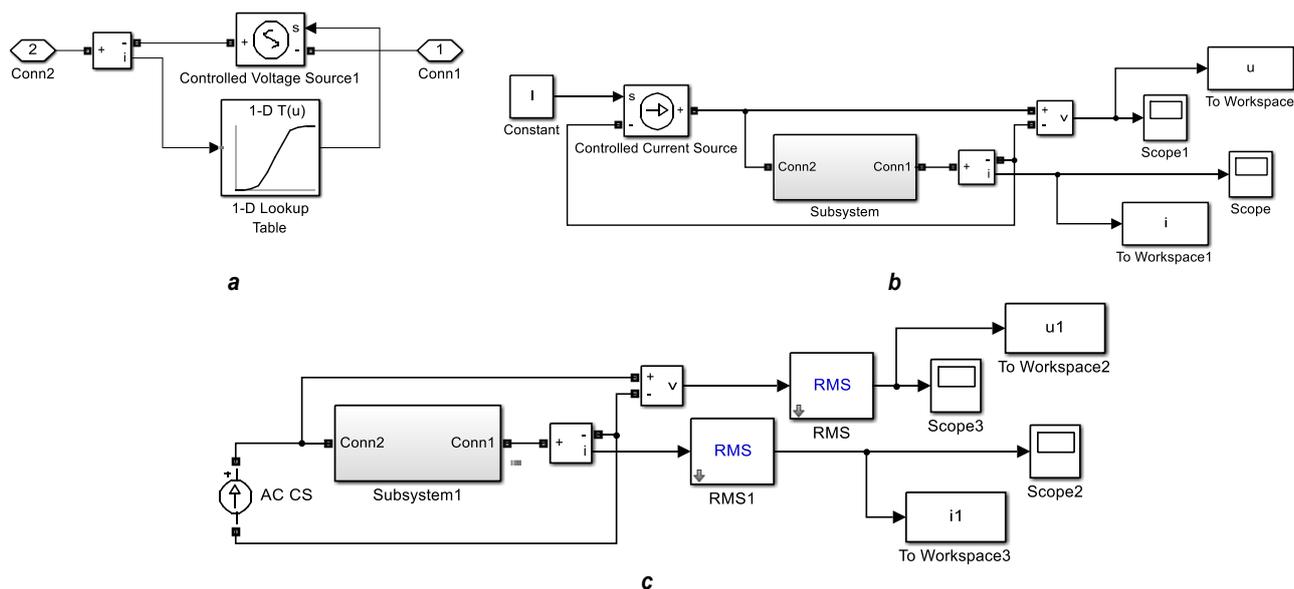


Рис. 4. Модель нелинейного сопротивления (а), получение вольтамперной характеристики в мгновенных значениях (b) и в действующих значениях (c)
 Fig. 4. Model of nonlinear resistance (a), obtaining of current-voltage characteristics in instantaneous (b) and effective values (c)

цепь с синусоидальным источником переменного тока, а результаты измерений переводятся в действующие значения с помощью модулей расчета среднеквадратичных значений основной частоты RMS (номинальная максимальная синусоидальность, от англ. Rated Maximum Sinusoidal) [20].

В результате расчетных экспериментов получены ВАХ в мгновенных и действующих значениях на рис. 5. Установлено, что ВАХ в мгновенных значениях отличается в большую сторону от ВАХ в действующих значениях ориентировочно в 1,14 раза.

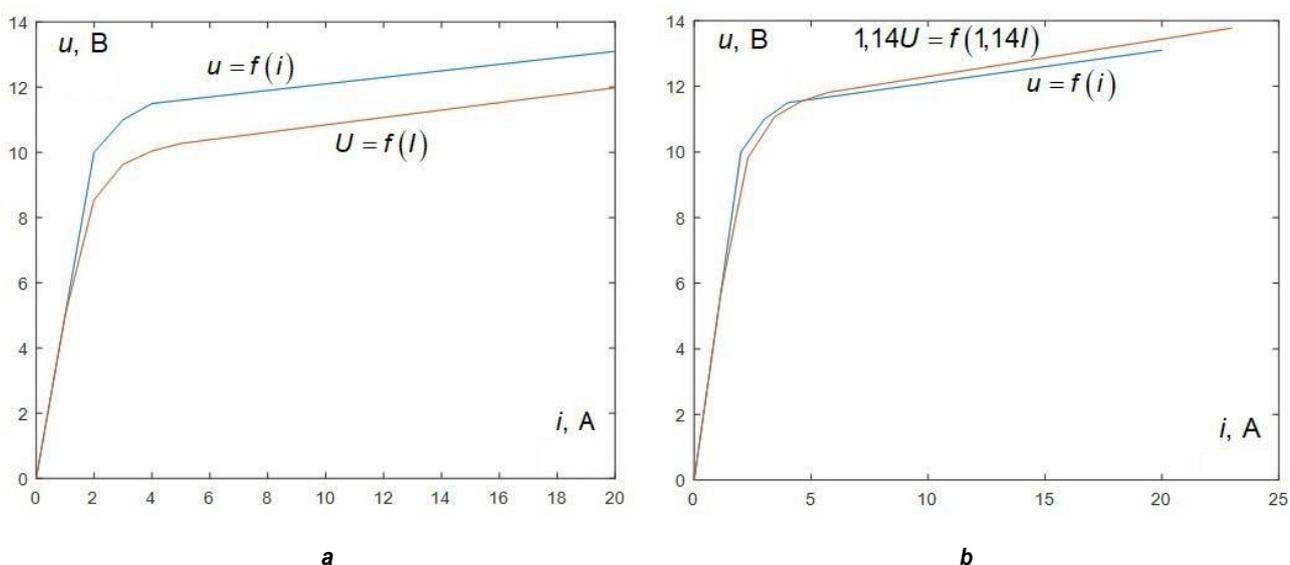


Рис. 5. Вольтамперные характеристики нелинейного сопротивления, снятые в мгновенных и действующих значениях (а), и те же характеристики после умножения вольтамперной характеристики в действующих значениях на коэффициент 1,14 по току и напряжению (b)
 Fig. 5. Current-voltage characteristics of nonlinear resistance taken in instantaneous and effective values (a), the same characteristics after multiplication of the current-voltage characteristic in effective values by a factor of 1.14 for current and voltage (b)

Так как точки перегиба у двух характеристик на рис. 5 *b* отличаются несущественно, то ВАХ в модели ТТ можно задавать в действующих значениях (как их обычно и снимают в эксплуатации), умноженных на 1,14.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обе разработанные модели ТТ проверены при имитации различных режимов работы: при номинальном первичном токе и замкнутой вторичной обмотке; при номинальном первичном токе и разомкнутой вторичной обмотке; при номинальном первичном токе и вторичной нагрузке, превышающей номинальную; при первичном синусоидальном токе КЗ; в переходном режиме КЗ с апериодической составляющей тока. Для моделирования принят ТТ типа ТПЛ-10. На рис. 6 представлены осциллограммы напряжения на вторичной обмотке при ее размыкании и протекании номинального тока по первичной обмотке ТТ.

При разомкнутой вторичной обмотке на осциллограмме (см. рис. 6) видны перенапряжения на разомкнутой вторичной обмотке, что соответствует реальным физическим процессам во вторичной обмотке при таком режиме.

На рис. 7 представлены осциллограммы первичного и вторичного токов ТТ при токе в первичной обмотке, превышающие номинальный.

На рис. 7 очевидно, что при первичном токе, значительно превышающем номинальный, наблюдается насыщение ТТ, а на осциллограмме вторичного тока видны срезы. Аналогичные эффекты получены при меньших первичных токах в случае задания вторичной нагрузки ТТ, превышающей номинальную.

На рис. 8 показаны осциллограммы первичного и вторичного токов ТТ при переходном процессе с апериодической составляющей.

Затухание апериодического тока во вторичной обмотке происходит быстрее, чем в первичном контуре ТТ (см. рис. 8), также наблюдаются искажения формы вторичного тока во время протекания апериодического тока за счет эффекта насыщения магнитопровода ТТ.

В целом характеристики вторичного тока в моделях Simulink и Simscape полностью совпадают, тем не менее модель с использованием блоков MATLAB Simscape на рис. 3 показала более стабильную работу во всех режимах.

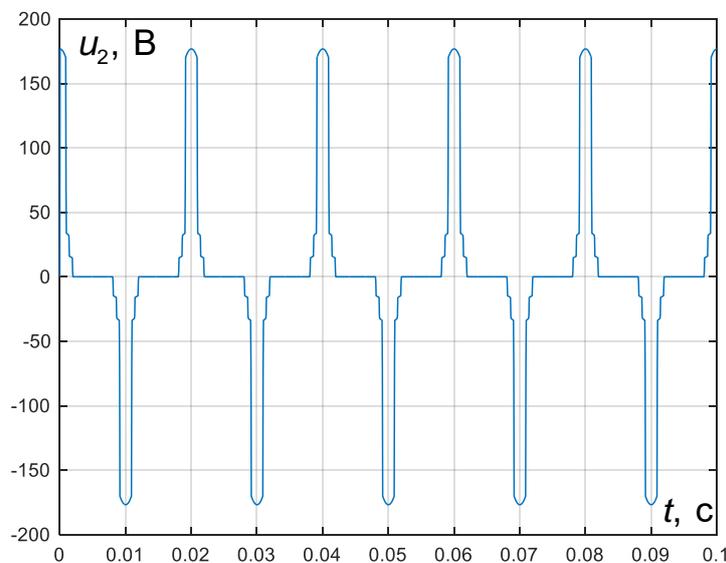


Рис. 6. Осциллограмма напряжения на вторичной обмотке трансформатора тока при разомкнутой вторичной обмотке и первичном токе 50 А

Fig. 6. Oscillogram of voltage on the secondary winding of the current transformer with an open secondary winding and a primary current of 50 A

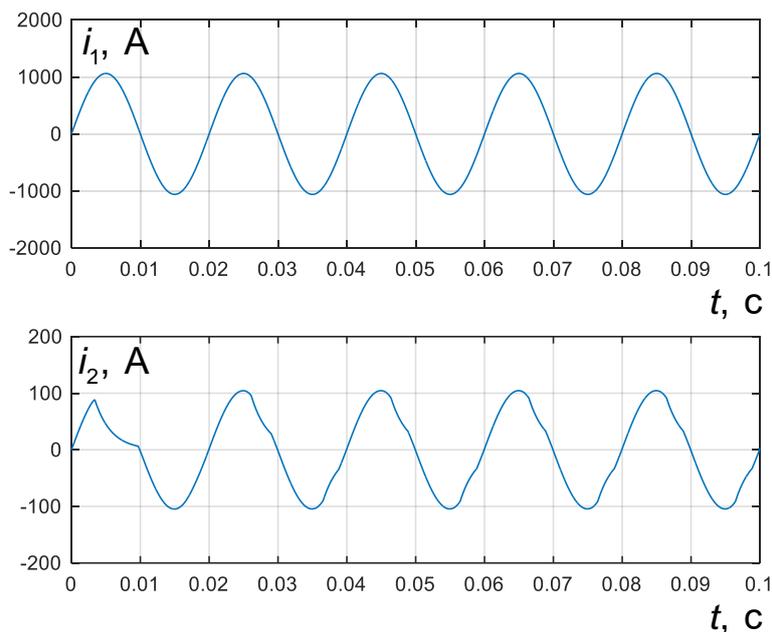


Рис. 7. Осциллограммы токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора тока при первичном токе 750 А и вторичной нагрузке $R_2 = 0,48 \text{ Ом}$, $L_2 = 1,146 \text{ мГн}$
Fig. 7. Oscillograms of currents in primary and secondary windings of the current transformer at a primary current of 750 A and a secondary load $R_2 = 0.48 \text{ Ohm}$, $L_2 = 1.146 \text{ mH}$

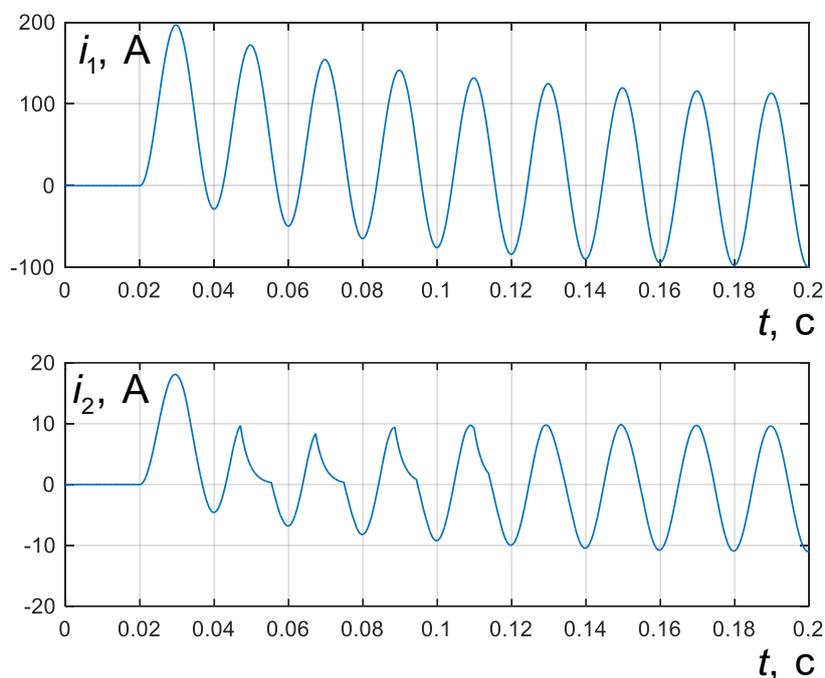


Рис. 8. Осциллограммы токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора тока в переходном режиме с аperiodической составляющей тока при первичном токе 75 А и вторичной нагрузке $R_2 = 0,96 \text{ Ом}$, $L_2 = 2,292 \text{ мГн}$
Fig. 8. Oscillograms of currents in primary and secondary windings of the current transformer in the transient mode with an aperiodic current component at a primary current of 75 A and a secondary load $R_2 = 0.96 \text{ Ohm}$, $L_2 = 2.292 \text{ mH}$

Для проверки разработанной модели ТТ придуманы и внедрены модели двух реальных ТТ: ТПЛ-10 с коэффициентом трансформации 50/5 и ТВЛМ-10 с коэффициентом

трансформации 75/5. На данных ТТ выполнено снятие ВАХ с помощью испытательного комплекса РЕТОМ-21 и построены ВАХ на математической модели (рис. 9).

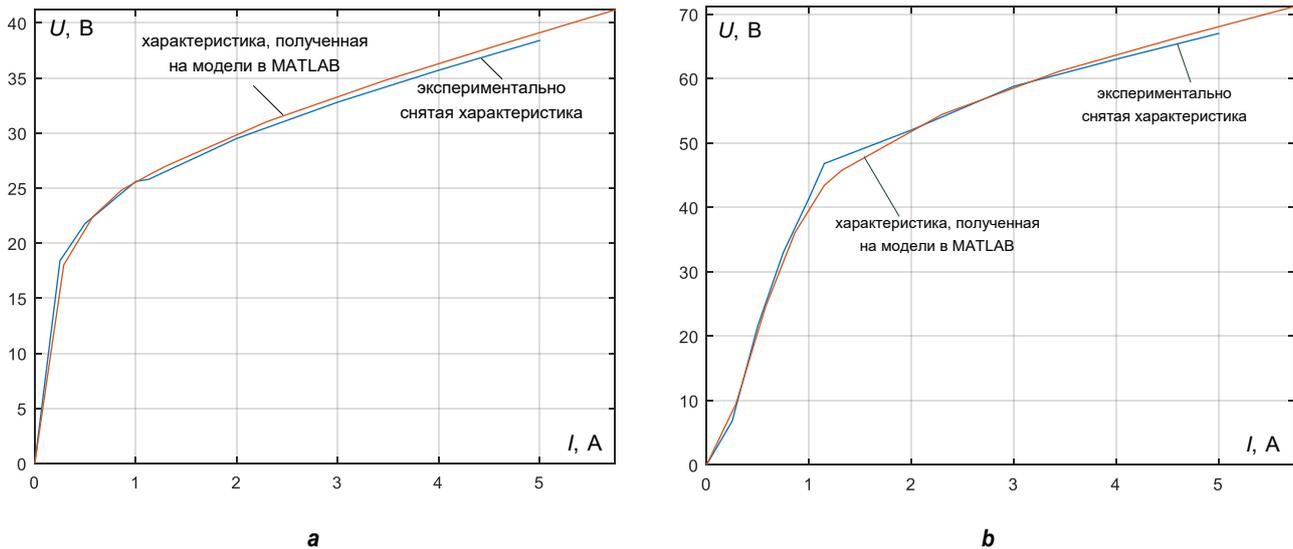


Рис. 9. Сравнение экспериментально снятой и полученной на модели вольтамперных характеристик трансформатора тока типа ТПЛ-10 50/5 (а) и ТВЛМ-10 75/5 (б)

Fig. 9. Comparison of current-voltage characteristics of TPL-10 50/5 (a) and TVLM-10 75/5 (b) types of the current transformer taken experimentally and obtained on the model

На рис. 9 видно, что ВАХ, снятые с помощью РЕТОМ-21 на обоих ТТ, совпадают с ВАХ, построенными на модели.

Также для верификации сняты осциллограммы вторичного тока на трансформаторе тока ТПЛ-10 в различных режимах (рис. 10):

1) при первичном токе 50 А в установившемся режиме синусоидального тока и вторичной нагрузке 9,6 Ом (рис. 10 а);

2) при первичном токе 10 А с апериодической составляющей и вторичной нагрузке 9,6 Ом (рис. 10 б);

3) при первичном токе 10 А с апериодической составляющей и вторичной нагрузке 39 Ом (рис. 10 с).

При помощи специальной программы в MATLAB получены осциллограммы в формате COMTRADE, которые подавались на ТТ от испытательного устройства РЕТОМ-51. COMTRADE является общепринятым форматом регистрации осциллограмм переходных процессов (аварий) в энергосистемах [21]. Вторичные токи при этом фиксировались осциллографом Fluke 190 с токовыми клещами.

Рис. 10 показывает, что снятые осциллограммы вторичных токов на реальном ТТ типа ТПЛ-10 идентичны графикам, полученным на упрощенной модели. Расхождение по ам-

плитудам токов составляет не более 10%. Вероятная причина расхождения – неучет активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния вторичной обмотки ТТ в упрощенной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены результаты исследования по разработке упрощенной математической модели ТТ на основе его ВАХ в средах MATLAB Simulink и MATLAB Simscape. Предложенная модель позволяет исследовать работу ТТ в различных установившихся и переходных режимах работы. Для моделирования ТТ требуются данные только о коэффициенте трансформации и о ВАХ, что упрощает моделирование в сравнении с известными моделями ТТ на основе дифференциальных уравнений.

Разработанные модели проверены в различных режимах работы ТТ. Модель с использованием блоков MATLAB Simscape показала более стабильную работу во всех режимах. Установлено, что при задании ВАХ в модели необходимо действующие значения напряжения и тока умножать на коэффициент 1,14 для перехода к мгновенным значениям напряжений и токов.

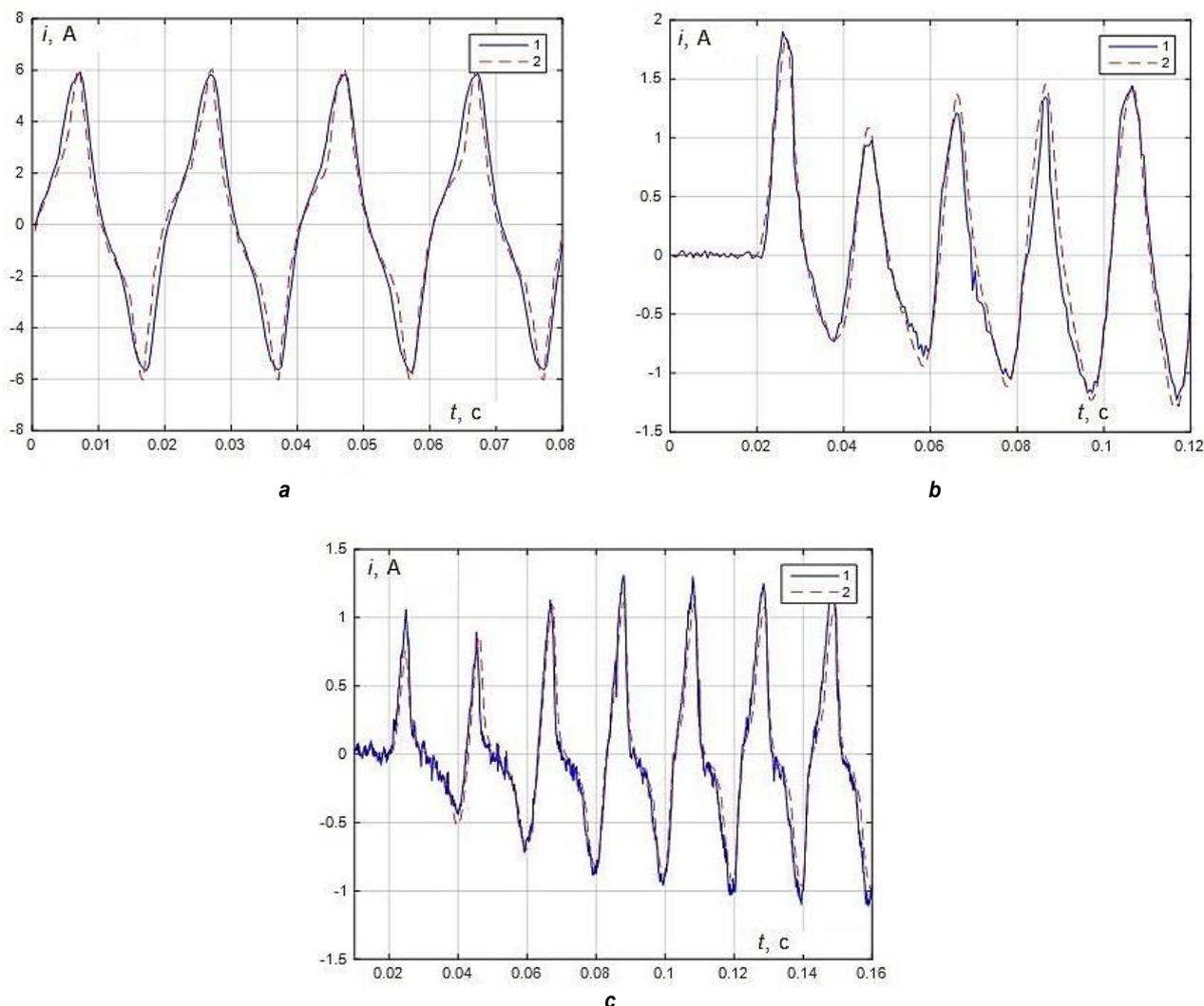


Рис. 10. Осциллограммы вторичного тока при первичном токе 50 А в установившемся режиме и вторичной нагрузке 9,6 Ом (а), при первичном токе 10 А с аperiodической составляющей и вторичной нагрузке 9,6 Ом (b) и при первичном токе 10 А с аperiodической составляющей и вторичной нагрузке 39 Ом (с): 1 – расчетные осциллограммы в MATLAB Simulink; 2 – осциллограммы, записанные осциллографом Fluke 190

Fig. 10. Oscillograms of the secondary current at a primary current of 50 A in the steady state and a secondary load of 9.6 Ohm (a), at a primary current of 10 A with an aperiodic component and a secondary load of 9.6 Ohm (b) and at a primary current of 10 A with an aperiodic component and a secondary load of 39 Ohm (c): 1 – calculated oscillograms in MATLAB Simulink, 2 – oscillograms recorded by a Fluke 190 oscilloscope

Для верификации модели при помощи устройств РЕТОМ-21 и РЕТОМ-51 сняты ВАХ с ТТ типа ТПЛ-10-50/5, ТВЛМ-10-75/5. Сравнение экспериментальных ВАХ с характеристиками, построенными на модели, показало почти полное совпадение данных.

Для проверки разработанной модели рассмотрены режимы насыщения ТТ током КЗ с аperiodической составляющей. Данные режимы воспроизведены при помощи сгенерированных файлов осциллограмм COMTRADE на устройстве РЕТОМ-51, сняты осциллограммы вторичного тока на ТТ типа ТПЛ-10-

50/5. Снятые осциллограммы на реальных ТТ идентичны полученным на модели, расхождение в мгновенных значениях токов не превышает 10%.

Таким образом, полученная упрощенная модель ТТ позволяет анализировать режимы работы РЗ при насыщении ТТ и довольно корректно учитывать влияние на работу ТТ аperiodического тока. Планируется доработка модели для возможности учета остаточной индукции магнитопровода и приближенного учета полного сопротивления вторичной обмотки.



Список литературы

1. Илюшин П.В., Небера А.А., Федоров О.А. Перспективы развития и инструменты автоматизации задач эксплуатации устройств РЗА // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 2. С. 28–37.
2. Долбилова Е.Г., Наконечный М.В. Основные направления развития систем релейной защиты и автоматики, проблемы и недостатки в микропроцессорной защите // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2012. Т. 1. С. 101–105.
3. Одинаев И.Н., Мурзин П.В., Паздерин А.В., Тащилин В.А., Шукало А. Анализ математических методов снижения погрешности трансформатора тока в режиме насыщения // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 2. С. 11–18. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
4. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Чередниченко К.В. Об обеспечении необходимой точности работы защитных трансформаторов тока в переходных режимах // Электрические станции. 2015. № 5. С. 53–60.
5. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А., Петров А.А., Костарев Л.Н. [и др.]. Анализ неселективных действий дифференциальных защит сборных шин при внешних однофазных коротких замыканиях с насыщением трансформатора тока в неповрежденной фазе // Релейная защита и автоматизация. 2019. № 1. С. 28–36.
6. Hunt R., Schaefer J., Bentert B. Practical experience in setting transformer differential inrush restraint // 61st Annual Conference for Protective Relay Engineers (TX, 1–3 April 2008). TX: IEEE, 2008. P. 118–141. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2008.4515051>
7. Gorji R.T., Hosseini S.M., Abdoos A.A., Ebadi A. A hybrid intelligent method for compensation of current transformers saturation based on PSO-SVR // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. 2021. Vol. 65. No. 1. P. 53–61. <https://doi.org/10.3311/PPee.16248>
8. Zheng Yuping, Wu Tonghua, Hong Feng, Yao Gang, Chai Jimin, Wei Zhinong. Transmission line distance protection under current transformer saturation // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2021. Vol. 9. Iss. 1. P. 68–76. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000095>
9. Zaytseva N., Fedosov D. Development of an algorithm for improving the reliability of digital differential protection in transient modes // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Chelyabinsk, 22–24 September 2020). Chelyabinsk: IEEE, 2020. P. 195–199. <https://doi.org/10.1109/UralCon49858.2020.9216232>
10. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Реализация математической модели трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2014. № 3. С. 19–28.
11. Миронюк Н.Е., Соболев А.С., Пудов В.И. Расчетная модель для оценки характеристик электромагнитных трансформаторов тока // Электричество. 2016. № 2. С. 19–28.
12. Kasztenny B., Mazereeuw J., DoCarmo H. CT saturation in industrial applications - analysis and application guidelines // 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers (Texas, 27–29 March 2007). Texas: IEEE, 2008. P. 418–425. <https://doi.org/10.1049/cp:20080074>
13. Новожилов М.А., Пионкевич В.А. Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. № 3. С. 553–574. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-553-574>
14. Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Суслов К.В., Полячкова М.А. Применение газотурбинной установки с прогнозными регуляторами в изолированной системе электроснабжения с асинхронной нагрузкой // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1. С. 48–54. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-1-48-54>
15. Новаш И.В., Румянцев Ю.В. Упрощенная модель трехфазной группы трансформаторов тока в системе динамического моделирования // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. 2015. № 5. С. 23–38.
16. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. Вып. 2. С. 43–51. <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.2.043-051>
17. Etingov D.A., Fedosov D.S. Development of restraint algorithm for improvement of reliability of transformer differential protection during external short circuits // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Chelyabinsk, 1–3 October 2019). Chelyabinsk: IEEE, 2019. P. 388–393. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877653>
18. Этингов Д.А., Федосов Д.С. Применение дифференциально-фазного принципа для повышения надежности дифференциальной защиты трансформатора // Электроэнергетика глазами молодежи – 2019: матер. юбилейной X Междунар. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 16–20 сентября 2019 г.). Иркутск: Изд-во ИРГТУ, 2019. С. 79–82.
19. Мазалева Н.Н., Горбенко Ю.М. Схемы замещения трансформаторов тока и трансреакторов // Вологодские чтения. 2002. № 28. С. 15–17.
20. Tokić A., Milardić V., Kasumović M., Demirović D. Conversion of RMS into instantaneous transformer saturation characteristics – implementation in MATLAB/SPS-ST // International Review of Electrical Engineering. 2019. Vol. 14. No. 5. P. 367–374. <https://doi.org/10.15866/iree.v14i5.17298>
21. Кухарчук А.В., Живых А.А. Использование формата COMTRADE при анализе работы моделей MATLAB Simulink // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика. 2018. Т. 1. С. 141–145.

References

1. Ilyushin P, Nebera A, Fedorov O. Development perspectives and automation tools for the tasks of relaying protection maintenance. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2017;2:28–37. (In Russ.)
2. Dolbilova EG, Nakonechny MV. Major trends in the development of relay protection and automation systems, problems and shortcomings in microprocessor protection. *Nauchno-tekhnicheskoe i ehkonomicheskoe sotrudnichestvo stran Aziatsko-Tihookeanskogo regiona v XXI veke*. 2012;1:101–105. (In Russ.)
3. Odinaev IN, Murzin PV, Pazderin AV, Tashchilin VA, Shukalo A. Analysis of mathematical methods for decreasing the saturated current transformer error. *Ehlektrrotekhnicheskie sistemy i komplekсы = Electrotechnical Systems and Complexes*. 2020;2:11–18. (In Russ.) [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2\(47\)-11-18](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-2(47)-11-18)
4. Kuzhekov SL, Degtyarev AA, Cherednichenko KV. Ensuring required operation accuracy of protective current transformers in transient modes. *Elektricheskie stantsii = Power Technology and Engineering*. 2015;5:53–60. (In Russ.)
5. Kuzhekov SL, Degtyarev AA, Doni NA, Shurupov AA, Petrov AA, Kostarev LN, et al. Analysis of non-selective actions of busbar differential protection at external single-phase short circuits with saturation of current transformer in a healthy phase. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2019;1:28–36. (In Russ.)
6. Hunt R, Schaefer J, Bentert B. Practical experience in setting transformer differential inrush restraint. In: *61st Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 1–3 April 2008, TX. TX: IEEE; 2008, p. 118–141. <https://doi.org/10.1109/CPRE.2008.4515051>
7. Gorji RT, Hosseini SM, Abdoos AA, Ebadi A. A hybrid intelligent method for compensation of current transformers saturation based on PSO-SVR. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. 2021;65(1):53–61. <https://doi.org/10.3311/PPEE.16248>
8. Zheng Yuping, Wu Tonghua, Hong Feng, Yao Gang, Chai Jimin, Wei Zhinong. Transmission line distance protection under current transformer saturation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. 2021;9(1):68–76. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000095>
9. Zaytseva N, Fedosov D. Development of an algorithm for improving the reliability of digital differential protection in transient modes. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 22–24 September 2020, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2020, p. 195–199. <https://doi.org/10.1109/UralCon49858.2020.9216232>
10. Novash IV, Rumyantsev YuV. Mathematical model implementation of wye-connected current transformers in dynamic simulation system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2014;3:19–28. (In Russ.)
11. Mironyuk NE, Sobolev AS, Pudov VI. Calculation model for estimation accuracy of characteristics of electromagnetic transformers of the current. *Elektrichestvo*. 2016;2:19–28. (In Russ.)
12. Kasztenny B, Mazereeuw J, DoCarmo H. CT saturation in industrial applications - analysis and application guidelines. In: *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 27–29 March 2007, Texas. Texas: IEEE; 2008, p. 418–425. <https://doi.org/10.1049/cp:20080074>
13. Novozhilov MA, Pionkevich VA. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):553–574. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-553-574>
14. Bulatov YuN, Kryukov AV, Suslov KV, Polyachkova MA. Application of a gas turbine plant with predictive controllers in an isolated power supply system with an asynchronous load. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*. 2021;1:48–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2021-1-48-54>
15. Novash IV, Rumyantsev YuV. A simplified model of three-phase bank of current transformers in the dynamic simulation system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh ob'edinenij SNG. Energetika = Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2015;(5):23–38. (In Russ.)
16. Tikhonov AI, Karzhevin AA, Podobny AV, Dryazgov DE. Development and study of a dynamic model of single-phase amorphous steel core transformer. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta = Vestnik of the Ivanovo State Power Engineering University*. 2019;2:43–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2019.2.043-051>
17. Etingov DA, Fedosov DS. Development of restraint algorithm for improvement of reliability of transformer differential protection during external short circuits. In: *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 1–3 October 2019, Chelyabinsk. Chelyabinsk: IEEE; 2019, p. 388–393. <https://doi.org/10.1109/URALCON.2019.8877653>
18. Etingov DA, Fedosov DS. Application of the phase comparison principle for improvement of reliability of the transformer differential protection. In *Elektroenergetika glazami molodezhi – 2019: materialy yubilejnoj X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Electric power industry through the eyes of youth - 2019: materials of the anniversary 10th International scientific and technical conference*. 16–20 September 2019, Irkutsk. Irkutsk: Irkutsk State Technical University; 2019, p. 79–82. (In Russ.)
19. Mazaleva NN, Gorbenko YuM. Equivalent circuits for current transformers and transreactors. *Vologdinskije chteniya*. 2002;28:15–17. (In Russ.)
20. Tokić A, Milardić V, Kasumović M, Demirović D. Conversion of RMS into instantaneous transformer saturation characteristics – implementation in MATLAB/SPS-ST. *International Review of Electrical Engineering*. 2019;14(5):367–374. <https://doi.org/10.15866/iree.v14i5.17298>



21. Kukharchuk AV, Zhiviyh AA. Using the Comtrade format in analysis of work of the MATLAB Simulink models.

Innovatsionnye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika. 2018;1:141–145. (In Russ.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Мухаметгалева Татьяна Сергеевна,
магистрант,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
e-mail: tatiana_m98@mail.ru

Tatiana S. Mukhametgaleeva,
Master's Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
e-mail: tatiana_m98@mail.ru

Федосов Денис Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой электрических станций, сетей
и систем,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;
✉ e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Denis S. Fedosov,
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Electric Stations,
Networks and Systems,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;
✉ e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Заявленный вклад авторов

Мухаметгалева Т.С. – разработка математических моделей трансформаторов тока в MATLAB Simulink; проведение расчетов; обработка результатов; измерение и обработка осциллограмм в натурных экспериментах на реальных трансформаторах тока.
Федосов Д.С. – идея для разработки упрощенных математических моделей трансформаторов тока; внедрение программы в MATLAB; участие в разработке и проверке корректности моделей в MATLAB Simulink; измерение и обработка осциллограмм в натурных экспериментах на реальных трансформаторах тока.

Contribution of the authors

Mukhametgaleeva T.S. developed mathematical models of current transformers in MATLAB Simulink, performed calculations, processed the results, measured and processed the oscillograms in field experiments on real current transformers.
Fedosov D.S. introduced an idea for the development of simplified mathematical models of current transformers, implemented the program in MATLAB, participated in the development of models and their validation in MATLAB Simulink, measured and processed the oscillograms in field experiments on real current transformers.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 28.04.2021; одобрена после рецензирования 03.06.2021; принята к публикации 20.08.2021.

Information about the article

The article was submitted 28.04.2021; approved after reviewing 03.06.2021; accepted for publication 20.08.2021.