



## АНАЛИЗ РАБОТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПЕРЕХОДНОМ РЕЖИМЕ, СОПРОВОЖДАЮЩЕМСЯ НАСЫЩЕНИЕМ ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Новобрицкий В.А., Федосов Д.С.

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Россия  
novobritsky.va@gmail.com  
fedosov\_ds@istu.edu

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Рассмотреть проблему работы релейной защиты в переходных режимах, сопровождающихся насыщением трансформатора тока. *МЕТОДЫ.* В работе применяется метод имитационного моделирования, сформированный в программной среде MATLAB Simulink. Для реализации графического представления результатов применяется метод разделения переменных. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* На основании проведенного исследования выявлено, что при применении требований стандарта ГОСТ Р 58669-2019, в котором регламентируются наилучшая комбинация ряда неблагоприятных факторов для трансформаторов тока в переходном режиме, функционирование трансформатора тока в таком состоянии может оказать серьезное влияние на корректность работы релейной защиты, основанной на токовом, дистанционном или дифференциальном принципе действия. Насыщение трансформатора тока может приводить как к ложной работе устройств релейной защиты, так и к отказу их срабатывания. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* По результатам исследования определено, что наибольшее влияние на работу защиты оказывает наличие апериодической составляющей в первичном токе короткого замыкания. Задержки восстановления действующего значения тока КЗ достигали до 0,3 сек, что сопоставимо со временем срабатывания вторых ступеней защит для микропроцессорных устройств релейной защиты. Наибольшее содержание тока намагничивания, наибольшая угловая погрешность, а также наибольшее содержание второй гармонической составляющей во вторичном токе КЗ наблюдались именно при больших значениях постоянной времени апериодической составляющей первичного тока и наличии остаточной магнитной индукции трансформатора тока.

**Ключевые слова:** Трансформатор тока; релейная защита; апериодическая составляющая; остаточная намагниченность; время до насыщения; ток намагничивания, вторая гармоника, PR, TPZ, TPY.

**Благодарность:** Исследования выполнены при финансовой поддержке по гранту государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FZZS-2020-0039) / The research was carried out with the financial support under a state assignment grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FZZS-2020-0039)

Для цитирования Новобрицкий В.А., Федосов Д.С. Анализ работы устройств релейной защиты в переходном режиме, сопровождающемся насыщением трансформатора тока. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 5. С. 71-85. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85.

## ANALYSIS OF THE OPERATION OF RELAY PROTECTION DEVICES IN TRANSIENT MODE, ACCOMPANIED BY SATURATION OF THE CURRENT TRANSFORMER

VA. Novobritsky, DS. Fedosov  
Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation  
novobritsky.va@gmail.com  
fedosov\_ds@istu.edu

**Abstract:** *THE PURPOSE.* This paper considers the problem of relay protection functioning when the current transformer reaches the saturation mode which is provided by transient processes. *METHODS.* MATLAB Simulink software environment allows reproducing the method of state-space representation by using structural blocks. The model is verified by comparison the time to saturation, obtained by calculation and according to the graphical data of the model. The separation of variables method extracts and graphically displays the investigated components. *RESULTS.* This paper reveals that applying the requirements of IEC 61869-2:2012 standard, which determines the worst combination of series of unfavorable factors for current transformers in transient mode, can influence a serious impact on the correct operation of relay protection based on current, reactance or differential principle of action. Saturation of the current transformer can lead to both negative results: false operation of relay protection devices and their failure. *CONCLUSION.* According to the results of the study, it was determined that the presence of a DC component in the primary short-circuit current has the greatest effect on the protection operation. The delays in the restoration of the RMS value of the short-circuit current reached up to 0.3 seconds, which is comparable with the response time of the second protection zones for microprocessor-based relay protection devices. The DC component of the primary current and the presence of residual magnetic induction of the current transformer provides the largest content of the magnetization current, the largest angular error and also the largest content of the second harmonic component in the secondary short-circuit current.

**Keywords:** *Current transformer; relay protection; DC component; residual magnetization; time to saturation; second harmonic, PR, TPZ, TPY.*

**Acknowledgments:** *The research was carried out with financial support under the grant of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZZS-2020-0039) / The research was carried out with financial support under the grant of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZZS-2020-0039).*

**For citation:** Novobritsky VA, Fedosov DS. The main types of wind turbines-generators in the power supply system. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021; 23(5):71-85. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-5-71-85.

### **Введение**

Работа существующих устройств и комплексов релейной защиты (далее РЗ) до сих пор продолжает базироваться на данных, полученных от измерительных трансформаторов тока (далее ТТ) и напряжения. Наличие посредника между первичной и вторичной цепью позволяет решить ряд задач: удешевление изоляции вторичного оборудования, обеспечение безопасности работы обслуживающего персонала, реализация защиты дифференциального принципа действия [1]. Но совместно с достоинствами представленный способ получения информации из первичной сети несет в себе ряд недостатков. Самым главным является возможность отказа измерительного трансформатора либо по техническому состоянию, либо в результате влияния негативных факторов, вызванных переходными процессами. Одним из таких факторов является работа измерительного ТТ в режиме насыщения. Известны масштабные аварии [2], произошедшие по причине излишней работы дифференциальной токовой защиты при коротком замыкании (далее КЗ) вследствие появления тока небаланса в цепях, обусловленного насыщением защитных обмоток трансформаторов тока из-за появления значительной по величине апериодической составляющей (далее АС) в первичном токе КЗ.

Следовательно, актуальной задачей является оценка влияния факторов переходного режима на работу измерительного ТТ и, как следствие, на работу устройств релейной защиты, подключенные к данному трансформатору.

Поведение быстродействующих устройств РЗ в переходных режимах зависит от кратности тока КЗ, места возникновения КЗ (в зоне или вне зоны действия), вида КЗ (симметричное или несимметричное), относительного содержания АС в токе КЗ, наличия и знака остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ, нагрузки на ТТ, а также от схемы соединения ТТ и способа передачи информации от последних в устройства защиты [3].

В общем случае достаточным требованием к ТТ в переходных режимах для обеспечения правильного функционирования быстродействующих устройств РЗ является

отсутствие насыщения магнитопровода в течение времени, необходимого для срабатывания защиты при КЗ в зоне действия, а также отсутствие насыщения магнитопровода ТТ в течение времени, необходимого для отключения быстродействующими защитами смежных элементов внешнего КЗ (в зоне их действия) с учетом задержки их срабатывания в переходном режиме. [4].

Таким образом, измерение тока является фундаментальным параметром для любого существующего типа РЗ.

**Методы**

Для моделирования ТТ используется схема замещения на Рис 1. При отсутствии влияния посторонних факторов, ток вторичной обмотки ТТ будет линейно пропорционален первичному току. В идеальном ТТ полностью отсутствуют потери, моделируемые нагревом сердечника и током намагничивания [5].

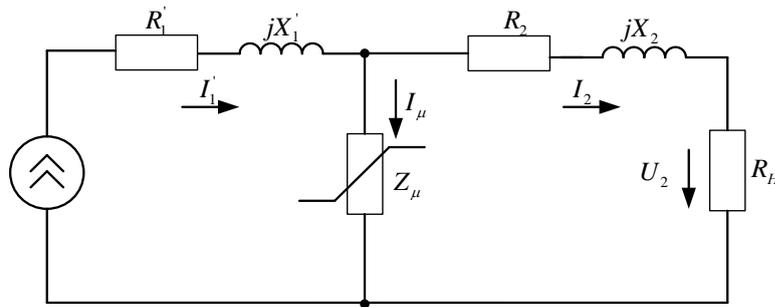


Рис 1. Эквивалентная модель трансформатора тока Fig. 1. Equivalent model of current transformer

Допущения, представленные в модели:

В условиях насыщения сердечников ТТ, как показали исследования, проведенные в Новочеркасском политехническом институте А. Д. Дроздовым и В.П Глуховым [6], допустимо не учитывать частные циклы перемагничивания сердечников, выраженные в виде гистерезиса и присущие всем видам магнитных материалов [7], для ТТ с использованием однозначной характеристики намагничивания.

При насыщении, когда величина магнитной индукции изменяется из одного крайнего положения к другому, влияние самого пути, определяемого гистерезисом, носит незначительный характер, следовательно применение прямоугольной характеристики намагничивания (далее ПХН), представленной на Рис 2 а, является идеальным случаем, и справедлива для схемы замещения ТТ на Рис 2 б. В то же время реальная характеристика намагничивания ТТ имеет наклон линейной части, отличный от 90 градусов. За счёт этого более близкой к реальной характеристике ТТ становится спрямлённая характеристика намагничивания (Далее СХН). Далее будем называть такие характеристики намагничивания упрощёнными.

Одной из целей данной работы является анализ корректности использования СХН для расчета времени до насыщения [8] (далее ВДН) ТТ и определение расчётных параметров ТТ в нормальном режиме при применении СХН с наклонным линейным участком.

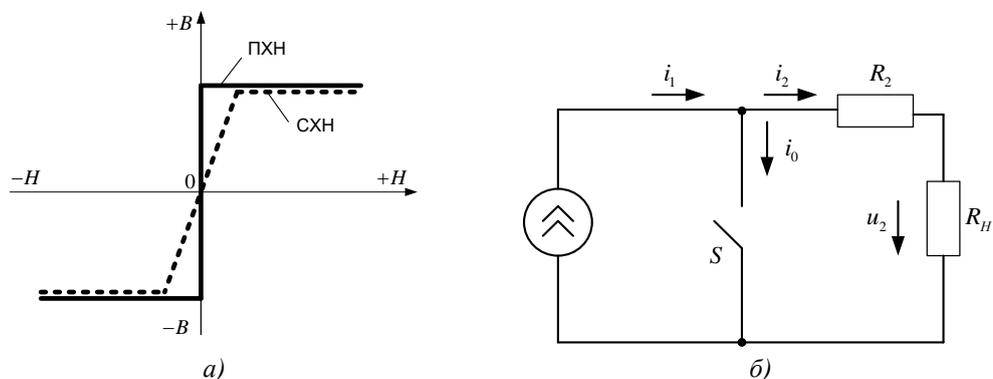


Рис. 2. Упрощённые характеристики ТТ (а) Fig. 2. Simplified characteristics of CT (a) упрощённая схема замещения ТТ с ПХН (б) simplified equivalent circuit of CT (b)

Уравнения для разработки модели трансформатора тока

Основу модели составляют известные уравнения ТТ [9], выраженные в системе (1). В первую очередь в модели определяется рабочая магнитодвижущая сила ( $F_{sat}$ , А), обусловленная наличием тока намагничивания ТТ. Ток намагничивания определяется как разность первичного ( $i_1$ , А) и вторичного тока ( $i_2$ , А).

Геометрическими показателями, характеризующими магнитопровод ТТ, являются длина средней силовой линии магнитного поля ( $L_{cp}$ , м) и площадь поперечного сечения ( $S$ , м<sup>2</sup>). Наличие информации о  $L_{cp}$  позволяет определить напряженность магнитного поля в сердечнике ( $H$ , А/м), создаваемую током намагничивания.

Так как для модели применяется ПХН или СХН, то первый наклонный участок характеристики ( $B_{sat.off}$ , Тл) моделируется с помощью применения коэффициента пропорциональности, зависящего от относительной магнитной проницаемости материала сердечника ( $\mu_0$ , о. е.) и магнитной постоянной ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м). Если необходимо смоделировать ТТ с ПХН, то коэффициент пропорциональности (а значит, относительная магнитная проницаемость материала сердечника) должен стремиться к бесконечности.

Для моделирования магнитной индукции с учетом насыщения ( $\max(B)$ ,  $\min(B)$ , Тл) применяется блок PS Saturation, позволяющий ограничить изменения магнитной индукции. Величина магнитной индукции насыщения ТТ определяется характеристикой стали магнитопровода [10].

По величине магнитной индукции и площади поперечного сечения магнитопровода можно найти значение магнитного потока в сердечнике ТТ ( $\Phi$ , Вб), а затем через количество витков вторичной обмотки ( $w_2$ ) определить суммарное потокоцепление ( $\Psi_2$ , Вб). По закону электромагнитной индукции вычисляется вторичная ЭДС ТТ ( $e_2$ , В) как производная потокоцепления во времени. Для определения напряжения на выводах вторичной обмотки ( $u_2$ , В) необходимо от полученной ЭДС отнять падение напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки ( $R_2$ , Ом) и индуктивности рассеяния вторичной обмотки ( $L_2$ , Гн).

Полная система уравнений ТТ с учётом введённых обозначений запишется как:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{sat} = i_1 w_1 - i_2 w_2; \\ H = \frac{F_{sat}}{L_{cp}}; \\ B = B_{sat.off} = \mu_0 \mu H; \\ B(0) = B_{res}; \\ \max(B) = B_{sat}; \\ \min(B) = -B_{sat}; \\ \Phi = BS; \\ \Psi_2 = \Phi w_2; \\ e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt}; \\ u_2 = e_2 - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

Для анализа работы ТТ с упрощёнными характеристиками намагничивания была разработана имитационная модель ТТ (Рис.3) в программной среде *MATLAB Simulink* [11] с использованием блоков библиотеки *Simscape*.

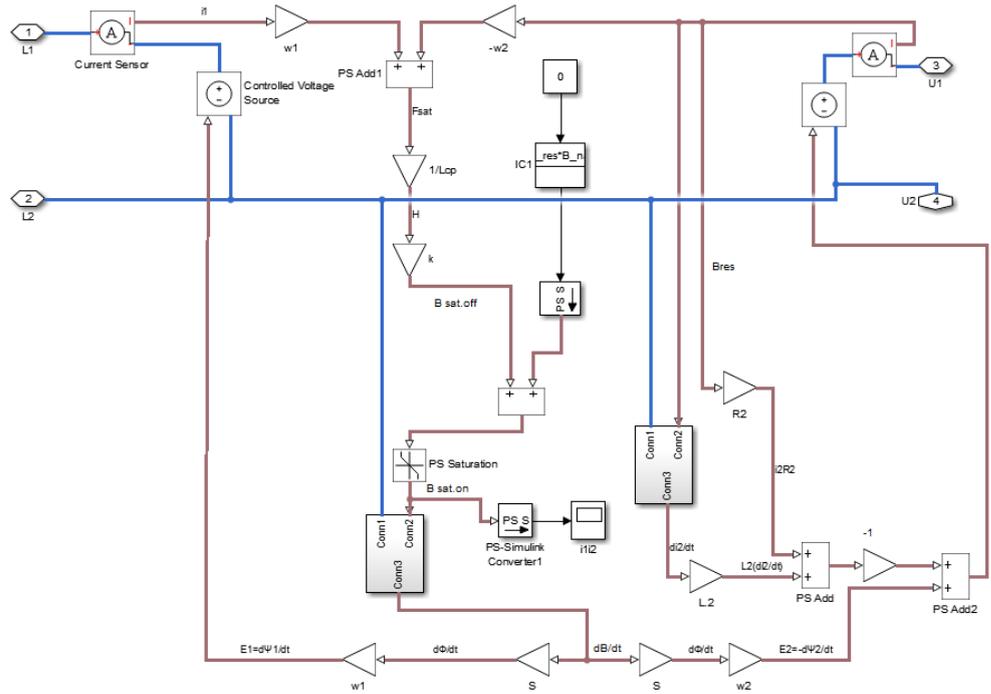


Рис. 3. Имитационная модель ТТ в программной среде MATLAB Simulink *Fig. 3. Simulation model of CT in the MATLAB Simulink software environment*

С использованием представленной модели ТТ производилось снятие вольтамперной характеристики (далее ВАХ) от источника переменного тока (Рис.4). Фиксировались действующие значения тока и напряжения намагничивания на вторичной обмотке ТТ.

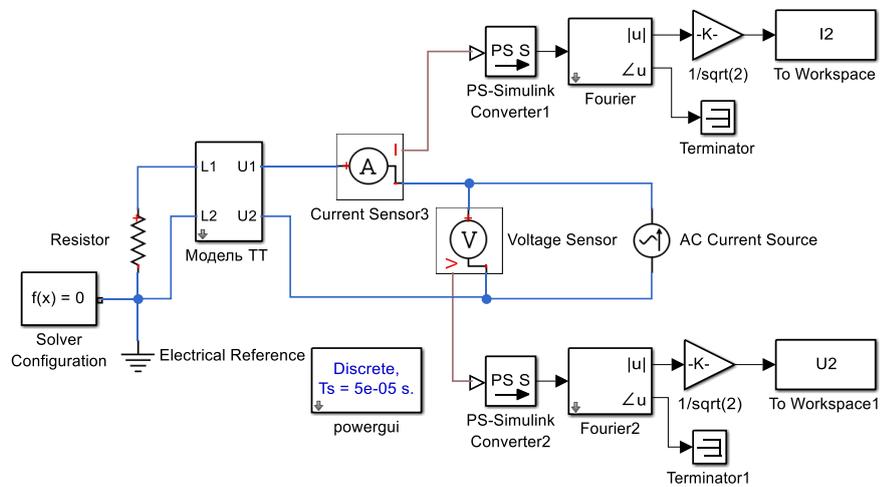


Рис. 4. Схема для снятия ВАХ исследуемой модели ТТ *Fig. 4 The scheme for obtaining the I-V curve of the CT model*

Как видно из графика ВАХ (Рис.5), точка перегиба ВАХ, снятой на модели, соответствует расчетной величине. Таким образом, разработанная модель подтверждает корректность использования ПХН для определения предельного напряжения намагничивания и времени до насыщения.

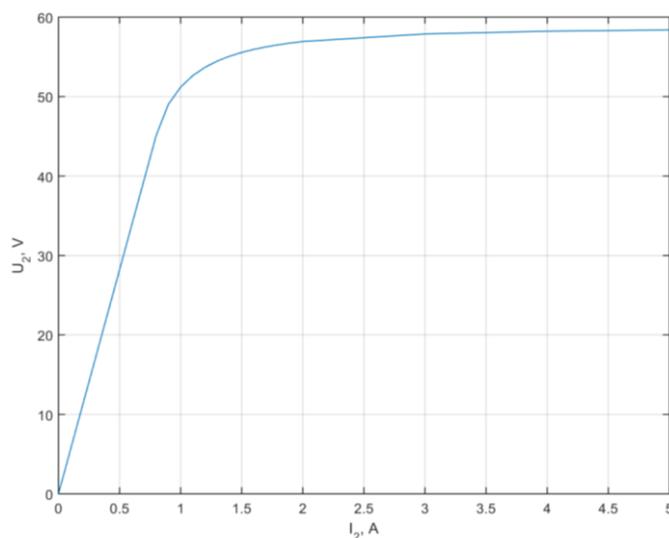


Рис.5 ВАХ, полученная на исследуемой модели ТТ

Fig. 5 The current–voltage characteristic

Анализ первого линейного участка ВАХ:

Наклон линейного участка ВАХ характеризуется только параметрами материала магнитопровода в ненасыщенном состоянии. При наличии в магнитопроводе воздушного зазора, который используется у ТТ классов точности PR, TPY, TPZ, характеристика на линейном участке будет более пологой (похожей на СХН), следовательно, и величина погрешности ТТ в нормальном режиме и в режиме до насыщения у таких ТТ будет выше, чем у ТТ с характеристикой, близкой к ПХН.

Пределы нормируемой погрешности при работе на линейном участке ВАХ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Класс точности	Предел допускаемых погрешностей вторичных обмоток ТТ для защиты					
	Предел допускаемой погрешности				Полной при токе номинальной предельной кратности $\epsilon$ , %	При переходном режиме, %
	При номинальном первичном токе		угловой			
	Токовой, %	мин				
5P, 5PR	±1	±60	± 1,8	5	Не нормируют	
10P, 10PR	±3	Не нормируют	Не нормируют	10	Не нормируют	
TPY	±1	±60	± 1,8	10	$\epsilon_{max} \leq 10$	
TPZ	±1	180 ± 18	5,3 ± 0,6	10	$\epsilon_{ac,max} \leq 10$	

Следовательно, наименьший угол наклона линейного участка ВАХ ограничен пределом допускаемой погрешности при номинальном первичном токе, так как именно в данном режиме рабочая точка ТТ будет гарантированно находится на этом участке СХН.

Поскольку ТТ находится на линейном участке, искажений формы тока и напряжения не возникнет. Следовательно, можно использовать выражения для действующих значений токов и напряжений и определять сопротивления переменному току, которые будут справедливы при работе ТТ на линейном участке СХН [12]. Используя закон Ома, определим выражение для действующего значения напряжения намагничивания:

$$U_{нам} = X_{\mu} \cdot I_{\mu}, \tag{2}$$

где  $X_{\mu}$  – индуктивное сопротивление ветви намагничивания;  $I_{\mu}$  – действующее значение тока намагничивания (Рис.6).

Сопротивление  $X_\mu$  является коэффициентом пропорциональности, связывающим величины  $I_\mu$  и  $U_{нам}$ . Чем меньше величина  $X_\mu$ , тем меньший угол наклона по отношению к горизонтальной оси будет иметь линейный участок СХН.

В соответствии с [13] сопротивление ветви намагничивания принято чисто индуктивным ввиду малых активных потерь в сердечнике ТТ. Все сопротивления, токи и напряжения приняты модулями их значений. Также пренебрежём сопротивлением рассеяния вторичной обмотки ТТ и будем считать, что вторичная нагрузка ТТ  $R_H$  имеет чисто активный характер. В результате получим схему замещения ТТ на рисунке 6 для анализа работы ТТ при синусоидальных токах (в нормальном установившемся режиме).

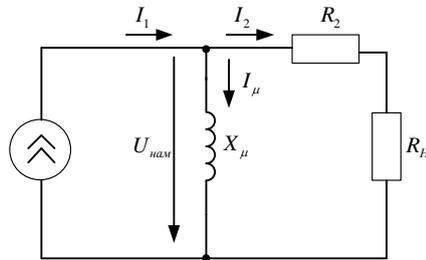


Рис.6. Схема замещения ТТ при протекании синусоидальных токов *Fig. 6. Equivalent circuit of CT with sinusoidal currents*

Наклон линейного участка СХН оказывает непосредственное влияние на постоянную времени вторичного контура ТТ, определяемую как:

$$T_s = \frac{L_\mu}{R_2 + R_H} = \frac{X_\mu}{(R_2 + R_H)\omega} \quad (3)$$

где  $\omega$  – угловая частота сети ( $2\pi f$ ), рад/с.

Величины токов в схеме замещения распределяются обратно пропорционально сопротивлениям параллельных ветвей:

$$\frac{I_\mu}{I_2} = \frac{R_2 + R_H}{X_\mu} \quad (4)$$

Выражая  $X_\mu$  через постоянную времени вторичного контура (3) и подставляя результат в выражение (4), получаем:

$$\frac{I_\mu}{I_2} = \frac{R_2 + R_H}{T_s (R_2 + R_H)\omega} = \frac{1}{T_s \omega} \quad (5)$$

В соответствии с [18] отношение тока  $I_\mu$  к  $I_2$  определяет величину токовой погрешности ТТ. Для режима с номинальным первичным током по таблице 2.3.4.1 отношение токов  $I_\mu/I_2$  для ТТ класса точности 5P, 5PR, TPZ, TPY оставляет 0,01. Для ТТ класса точности 10P, 10PR аналогичное отношение составит 0,03. Тогда на основании формулы (5):

$$T_s \geq \frac{1}{f_i \omega} \quad (6)$$

Следовательно, при частоте сети 50 Гц и номинальных синусоидальных токах постоянная времени вторичного контура ТТ не должна быть ниже:

- 1) 318 мс для ТТ классов 5P, 5PR, TPZ, TPY;
- 2) 106 мс для ТТ классов 10P, 10PR.

Таким образом, требования к погрешности ТТ при их работе в нормальном режиме, установленные в таблице 1, автоматически выполняются, если ТТ будет иметь указанные выше постоянные времени вторичного контура.

Далее модель ТТ интегрируется в представленную схему первичной сети. (Рис. 7). АС моделируются посредством задания постоянной времени через параметры активного и индуктивного сопротивления, и включения схемы в момент фазы угла напряжения равной нулю (рис.8).

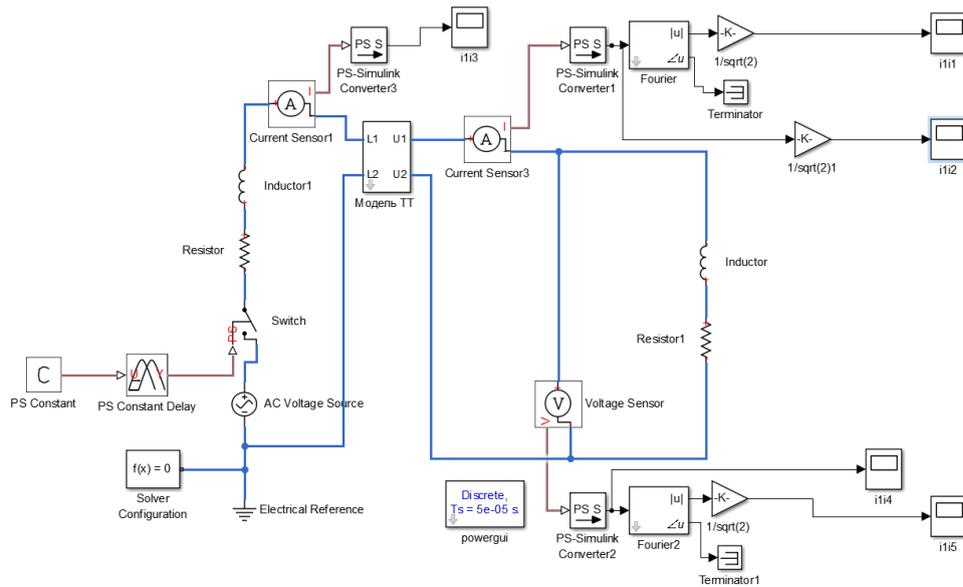


Рис 7. Первичная схема с использованием модели трансформатора тока *Fig. 7 Primary circuit with integrated current transformer model*

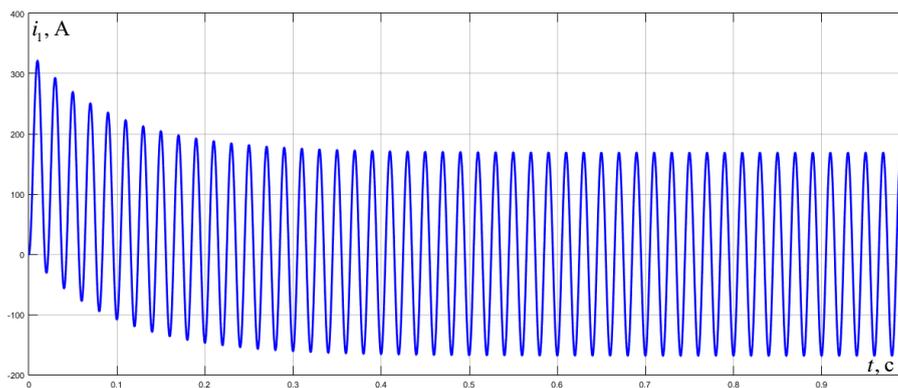


Рис 8. Изменение величины мгновенного значения первичного тока КЗ с АС *Fig. 8 The value of the instantaneous primary current with a DC component*

Остаточная магнитная индукция в модели учтена в соответствии с пунктом 4.3 ГОСТ-58669-2019, где указано, что по величине она равняется величине в 86% от предельной величины индукции насыщения.

Величина остаточной намагниченности может быть смоделирована двумя способами:

Первый способ представляет собой простое наложение постоянной величины (константы) на функцию изменения магнитной индукции (Рис 9):

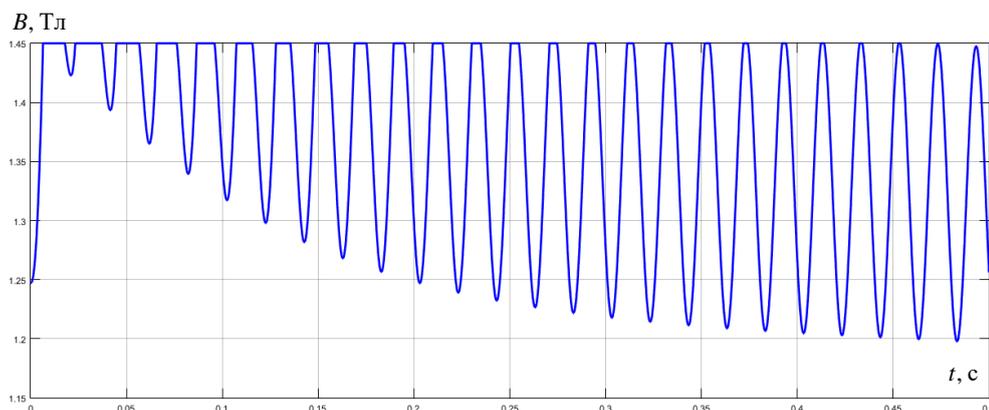


Рис. 9. Зависимость изменения магнитной индукции во времени, при моделировании остаточной магнитной индукции постоянной неизменной величиной. *Fig. 9. The value of the magnetic induction of CT using the constant block*

Указанный способ представляет собой модель, при которой величина остаточной магнитной индукции не уменьшается со временем, и, следовательно, размагничивания ТТ не происходит даже при длительном обтекании его большой величиной тока КЗ.

Подходит данная модель только для определения первого момента выхода ТТ в режим насыщения и полностью соответствует ГОСТ-58669-2019, так как в представленном стандарте не регламентируется размагничивание ТТ со временем.

Для устройств релейной защиты и автоматики вышеуказанный режим является слишком тяжёлым. Из-за полного отсутствия размагничивания следует, что трансформатор тока никогда не выйдет из режима насыщения.

Поэтому для более точного анализа разработан следующий вариант моделирования остаточной магнитной индукции.

Второй способ реализован посредством применения блока «*Initial condition*» программной среды *MATLAB Simulink*

Наличие АС в первичном токе КЗ обуславливает появление дополнительного магнитного потока, накладывающийся на магнитный поток, созданный периодической составляющей [14]. Ввиду отсутствия смены знака, магнитный поток, созданный АС тока КЗ, имеет накопительный эффект и занимает свободную часть магнитопровода ТТ (Рис 10). При достижении предельной величины магнитного потока ТТ переходит в режим насыщения, при котором периодическая составляющая тока КЗ трансформируется с большой погрешностью (Рис 11).

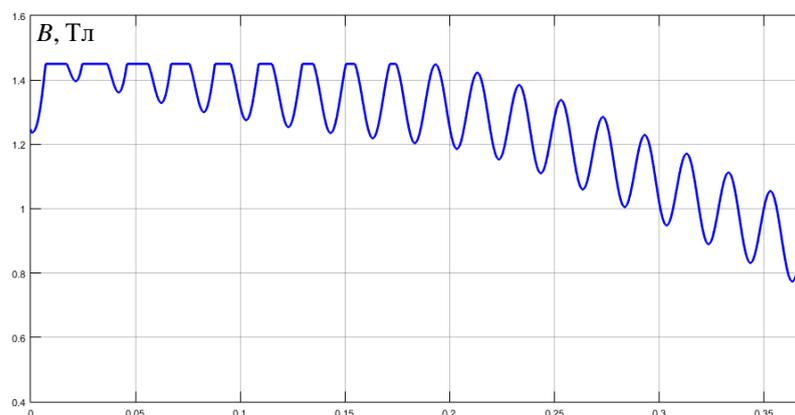


Рис 10. Изменение величины магнитной индукции ТТ при влиянии апериодической составляющей тока КЗ *Fig. 10 The value of the magnetic induction of CT using the Initial condition block*

Применение блока «*Initial condition*» позволяет задать только начальные стартовые условия для запуска системы, при этом последующее влияние на систему, в отличие от первого случая, будет полностью исключено. Со временем система

возвращается к своему установившемуся режиму, что является более точным отражением протекающих процессов в действительности.

Далее для анализа поведения устройств релейной защиты и автоматики будет использован второй вариант моделирования остаточной магнитной индукции.

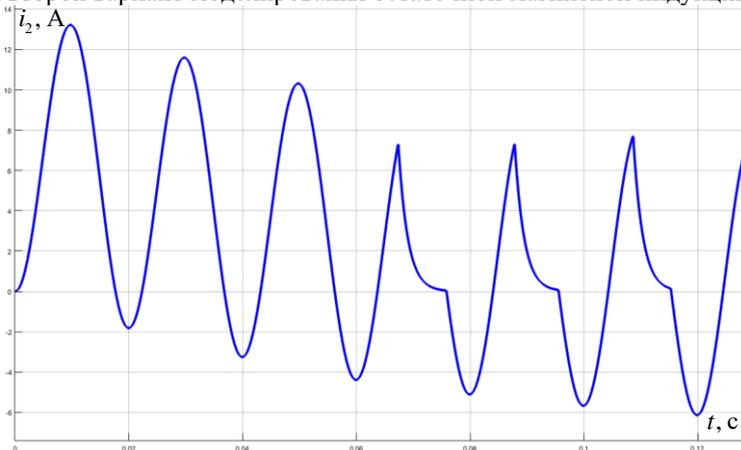


Рис. 11. Изменение величины вторичного тока КЗ с АС  $T_a$  равной 0,1с *Fig. 11 The value of the instantaneous secondary current with a DC component equal to 0.1s*

**Результаты и обсуждения**

Для оценки влияния работы ТТ в переходном режиме на действие релейной защиты рассматриваются следующие ключевые параметры [15]:

- 1) Изменение действующего значения вторичного тока КЗ;
- 2) Изменение действующего значения тока намагничивания ТТ;
- 3) Изменение угловой погрешности вторичного тока КЗ;
- 4) Измерение содержания доли второй гармоники во вторичном токе ТТ.

Для ТТ рассматривается режим при номинальных параметрах при токах номинальной предельной кратности. Доля остаточной намагниченности сердечника составляет 86%.

Главным критерием для оценки является замер того момента времени, при котором ТТ входит в допустимый класс точности работы (табл. 2) (рис.12).

Таблица 2

Зависимость времени восстановления действующего значения вторичного тока КЗ от величины  $T_a$

$T_a$ , сек	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
t, сек	0,05	0,11	0,19	0,23	0,27	0,3	0,33

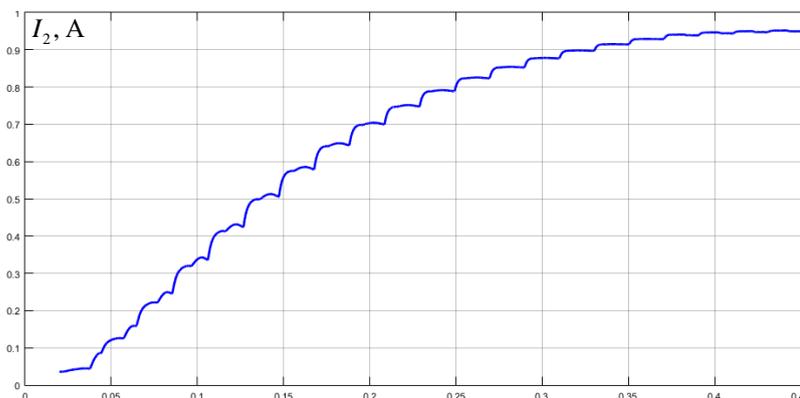


Рис. 12. Зависимость изменения действующего значения (в долях) вторичного тока КЗ от времени при номинальных параметрах при величине  $T_a$  равной 0,3 с *Fig. 12. Changing of the RMS value of the secondary current under normal conditions with a value of DC component equal to 0.3 s*

Измерение действующего значения вторичного тока КЗ актуально для работы первых ступеней токовых защит (ТО, ТНЗНП) при близких КЗ в зоне их действия. То

время, при котором ТТ начинает работать с допустимой погрешностью, является временем задержки срабатывания защиты. Критерием для действующего значения является момент, при котором доля величины тока достигает 90%. Главной опасностью задержки срабатывания являются то, что могут неселективно сработать защиты, являющиеся для рассматриваемого присоединения резервными. Для системообразующих связей задержка срабатывания защиты может привести к нарушению динамической устойчивости (рис. 13) [16].

Так как при определении действующих значений током намагничивания является та доля первичного тока, которая не зафиксирована во вторичном токе, то условием для его определения является разность между величиной действующего значения первичного и вторичного тока.

$$\dot{I}_\mu = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \quad (7)$$

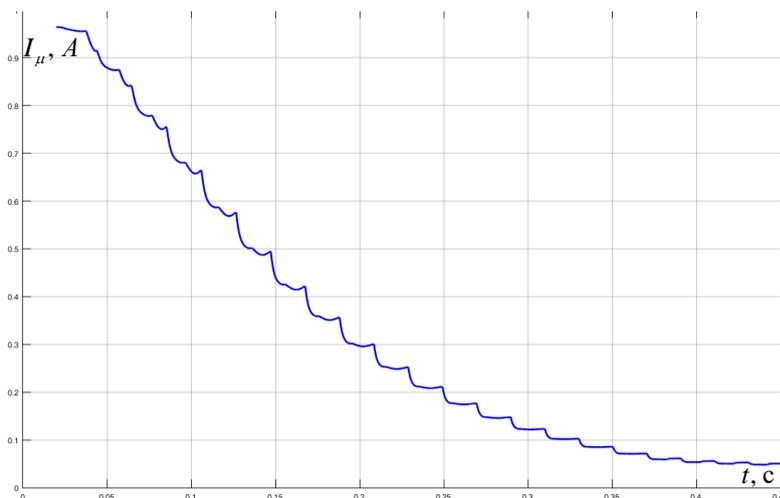


Рис. 13. Зависимость изменения тока намагничивания (в долях) при номинальных параметрах при величине T<sub>a</sub> равной 0,3 сек *Fig. 13 Changing of the RMS value of the magnetizing current under normal conditions with a value of DC component equal to 0.3 s*

Измерение величины тока намагничивания актуально для электромеханических дифференциальных защит шин и силовых трансформаторов, так как в случаях внешних близких КЗ именно ток намагничивания является расчётным током небаланса в защите. Увеличение тока небаланса выше величины уставки может привести к ложному срабатыванию дифференциальной защиты. [17]

Анализ изменения величины угла вторичного тока при работе ТТ в режиме насыщения является актуальным для действия направленных защит. К таким защитам относятся дистанционная защита, направленная высокочастотная защита (НВЧЗ), дифференциально-фазная защита (ДФЗ) и т.д. (табл. 3)

Таблица 3

Максимальная наблюдаемая угловая погрешность в зависимости от величины T<sub>a</sub>

T <sub>a</sub> , сек	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
δ°, град	19	41	60	73	82	87	90

Нарушение изменения угла происходит ввиду того, что искажается форма вторичного тока. Современные микропроцессорные защиты работают по анализу первой гармоники входящего сигнала. Посредством преобразования Фурье с извлечением первой гармоники из искажённого сигнала фазовый сдвиг получается с результатом, отличным от действительного. Степень отличия определяется искажения сигнала.

Для дистанционных защит результатами неправильных измерений могут являться ложные срабатывания при близких КЗ «за спиной» при попадании вектора сопротивления в зону срабатывания. Для ДФЗ, напротив, при КЗ в зоне действия защиты угол сигнала манипуляции может быть искажён до степени, достаточной для попадания в зону блокировки и отсутствия срабатывания защиты (табл.4), (рис. 14-15).

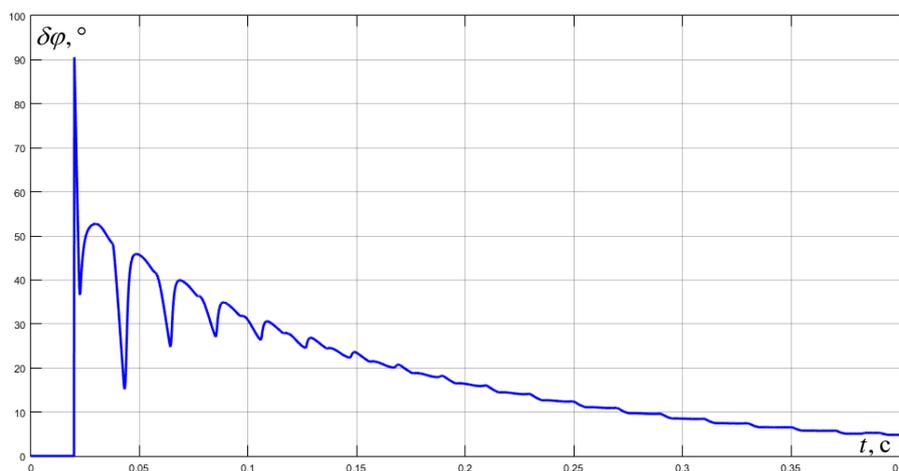


Рис 14. Зависимость изменения угловой погрешности вторичного тока КЗ при номинальных параметрах при величине  $T_a$  равной 0,3 сек

Fig. 14. Changing of angular error of secondary current under normal conditions with a value of DC component of 0.3 s

Таблица 4

Максимальная доля содержания второй гармоники во вторичном токе ТТ в зависимости от  $T_a$

$T_a$ , сек	0,01	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,30
$I_{2(2)}$ , %	85	124	136	139	140	140	140

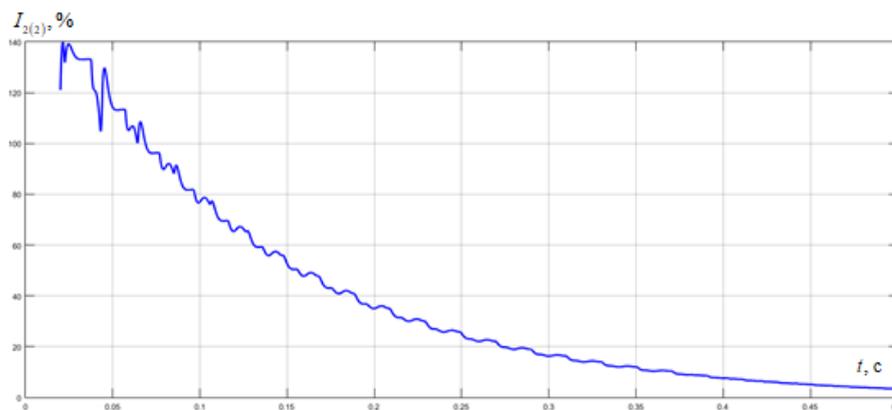


Рис 15. Изменение содержания второй гармоники (в процентах) во вторичном токе КЗ номинальных параметрах при величине  $T_a$  равной 0,3 сек

Fig. 15 Changing of the second harmonic content of secondary current under normal conditions with a value of DC component equal to 0.3 s

Анализ содержания доли второй гармоники в искажённом сигнале вторичного тока при насыщении ТТ может являться важнейшим маркером для выявления момента блокировки защиты. Особенно это актуально для микропроцессорных дифференциальных защит.

Бросок тока намагничивания (БТН) обосновывается наличием нелинейности сопротивления силового трансформатора в первый момент включения, при котором рабочая точка находится на втором линейном участке ВАХ в области насыщения, что приводит к резкому уменьшению сопротивления ветви намагничивания силового трансформатора. Исследования показали, что БТН сопровождается повышением содержания второй гармоники.

В настоящее время блокировка по условию наличия второй гармонической составляющей выполнена от БТН силовых трансформаторов. В данном случае искажение формы наблюдается в первичном токе, и, этот ток, проходя через ТТ, может вызвать ложную работу защиты. Принцип действия силового трансформатора ничем не отличается от принципа работы ТТ, из чего следует вывод, что при насыщении ТТ последний также

начинает генерировать сигнал второй гармоники во вторичном искажённом токе. Следовательно, данный факт даёт возможность применения представленных блокировок для выявления работы ТТ в нерегламентированном для него режиме насыщения.

### **Выводы**

В работе представлена и описана модель ТТ, позволяющая производить анализ работы релейной защиты в переходных режимах с учётом того, что в исследуемом ТТ имеется наличие остаточной магнитной индукции. Как показали исследования, негативные факторы переходного процесса и остаточной намагниченности существенно влияют на все измеряемые параметры, что может приводить либо к ложной работе, либо к отказу устройств РЗ. Одним из вариантов частичного решения проблемы является использование трансформаторов тока с ограниченной остаточной магнитной индукцией с классами точности TPZ, TPY и PR, что может снизить риски неправильной работы РЗ. Но даже в этом случае, при больших величинах АС первичного тока, существует вероятность некорректной работы ТТ.

### **Литература**

1. Dragan Ristanovic, Terry Tadlock, Gautami Bhatt, Current Transformers in Protection Applications: The ANSI and International Electrotechnical Commission Standards, Industry Applications journal IEEE. 2021. V. 27. no. 5. pp. 47-57.
2. Румянцев Ю.В. и др. Цифровой измерительный орган тока для функционирования в условиях глубокого насыщения трансформатора тока // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. № 6. С. 483–493.
3. Дмитриев М.В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей трансформаторы при учете конфигурации их магнитной системы / М. В. Дмитриев, Г. А. Евдокунин // Известия РАН. Энергетика. 2009. №2. С. 37-48
4. Naseri F., Kazemi Z., Arefi M.M, et al. Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: An extended Kalman filter-based approach. *IEEE Trans. Power Del.* 2018.V. 33. no. 1. pp. 110-118.
5. Баженов Н.Г., Антипанова И.С. Математическое описание электромагнитных процессов в трансформаторах. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2015. Т.(1-2). С. 107-114.
6. Глухов В.П., Дроздов В.А. О возможности обобщения характеристик перемагничивания массивных ферромагнитных сердечников. Изв. АН Латв.ССР. Сер. физ. и техн. наук. 1975. № 4. 79-87.
7. Сафин А.Р., Behera R.K. Аддитивное производство и оптимизация топологии магнитных материалов для электрических машин. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2021. Т. 23(3). С. 14-33.
8. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Воробьев В.С., и др. Определение времени до насыщения трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий // Электрические станции. 2017. № 1 (1026). С. 42-47.
9. Khalayasmaa A.I., Senyuk M.D., & Eroshenko S.A. (2021). Analysis of the State of High-Voltage Current Transformers Based on Gradient Boosting on Decision Trees. *IEEE Transactions on Power Delivery*.36(4). pp.2154-2163D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk. Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels, *Advanced Trends in Radioelectronics Telecommunications and Computer Engineering (TCSET) 2020 IEEE 15th International Conference on*. 2020. pp. 185-189.
10. Новожилов М.А., Пионкевич В.А. MATLAB в электроэнергетике. Иркутск: Изд-во ИРНТУ. 2016. 246 с.
11. Hargrave A., Thompson M. J. and Heilman B. Beyond the knee point: a practical guide to CT saturation. *71st Annual Conference for Protective Relay Engineers*. 2018. pp. 1-23.
12. Fallahi A., Ramezani N. (Asst. Prof. Ph.D.) & I. Ahmadi (Asst. Prof. Ph.D.) (2016) Current Transformers' Saturation Detection and Compensation Based on Instantaneous Flux Density Calculations, *Automatika*, 57. V.4. 1070-1078.
13. Сафонов Е.П., Фролов В.Я. Особенности переходных процессов в генераторных цепях мощных электротехнических комплексов. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2021. Т. 23(1). С. 105-118.
14. Kuzhekov S.L., Degtyarev A.A., Doni N.A., et al. Analysis of the non-selective actions of differential collecting busbar protection during external single-phase short circuits with saturation of the current transformer in an fault-free phase. *Rel. Zashch. Avtomat.* 2019. No. 1. 28-36.
15. Altuve H.J., Fischer N., Benmouyal G., & Finney D. (2013). Sizing current transformers

for line protection applications. 2013 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers.

16. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Колесников А.А., и др. Дифференциальная защита шин 110-220 кВ с применением метода двойной записи. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2017. Т. 19(11-12). С. 21-31.

#### Авторы публикации

**Новобрицкий Владислав Александрович** – аспирант, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

**Федосов Денис Сергеевич** – канд.техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электрических станций, сетей и систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет.

#### References

1. Dragan Ristanovic, Terry Tadlock, Gautami Bhatt, Current Transformers in Protection Applications: The ANSI and International Electrotechnical Commission Standards, *Industry Applications journal*. IEEE. 2021;27(5):47-57.

2. Rumiantsev YuV, Romaniuk FA, Rumiantsev VYu, et al. Digital Current Measurement Element for Operation During Current Transformer Severe Saturation. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2018;61(6):483-493. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-483-493>

3. Dmitriev MV and Evdokunin GA. Modeling transient processes in an electric grid containing transformers when taking account of the configuration of their magnetic system. *Izv. RAN. Énergetika*.2009;2:37-48.

4. Naseri F, Kazemi Z, Arefi MM. Fast discrimination of transformer magnetizing current from internal faults: *An extended Kalman filter-based approach*. IEEE Trans. Power Del. 2018;33(1):110-118.

5. Bagenov NG, Antipanova IS. The mathematical description of electromagnetic processes in the transformers. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2015;(1-2):107-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-1-2-107-114>

6. Glukhov VP, Drozdov VA. The possibility of generalizing the characteristics of magnetization reversal of massive ferromagnetic cores. *Izv. Academy of Sciences of the Latvian SSR. Ser. physical and tech. science*, 1975.

7. Safin AR, Behera RK. Additive manufacturing and topology optimization of magnetic materials for electrical machines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(3):14-33. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-14-33>.

8. Kuzhekov S, Degtyarev A, Vorob'ev V, et al. Determination of the time-to-saturation of current transformers in short-circuit transient regimes. *Power Technology and Engineering*. 2017 :51(2):234-239.

9. Khalyasmaa AI, Senyuk MD, & Eroshenko SA. (2021). Analysis of the State of High-Voltage Current Transformers Based on Gradient Boosting on Decision Trees. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 36(4), 2154.[9186646]. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.3021702>.

10. Yarymbash D, Kotsur M, Yarymbash S, et al. Electromagnetic Properties Determination Of Electrical Steels, *Advanced Trends in Radioelectronics Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*. 2020 IEEE 15th International Conference on. pp. 185-189 2020.

11. Novozhilov M and Pionkevich V. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters, *Proceedings of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta)*, 2019;23(3):553-574.

12. Hargrave A, Thompson MJ. and Heilman B. *Beyond the knee point: a practical guide to CT saturation*. 71st Annual Conference for Protective Relay Engineers, pp. 1-23, 2018.

13. Fallahi A, Ramezani N. Asst. Prof. Ph.D.) & I. Ahmadi (Asst. Prof. Ph.D.) (2016) Current Transformers Saturation Detection and Compensation Based on Instantaneous Flux Density Calculations. *Automatika*. 57:4;1070-1078. doi: 10.7305/automatika. 2017.04.1555.

14. Safonov EP, Frolov VYA. Features of fault transient's in generator network of powerful electric power stations. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021;23(1):105-118. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-105-118>.

15. Kuzhekov SL, Degtyarev AA, Doni NA, et al. Analysis of the non-selective actions of differential collecting busbar protection during external single-phase short circuits with saturation

© Новобрицкий В.А., Федосов Д.С.

of the current transformer in an fault-free phase. *Rel. Zashch. Avtomat.* 2019;1:28-36.

16. Altuve HJ, Fischer N, Benmouyal G, & Finney D. (2013). *Sizing current transformers for line protection applications*. 2013 66th Annual Conference for Protective Relay Engineers. doi:10.1109/cpre.2013.6822025.

17. Kulikov AL, Vukolov VYu, Kolesnikov AA, et al. Differential protection of busbar 110-220 kV with application of method of double entry. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2017;19(11-12):21-31. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2017-19-11-12-21-31>.

#### ***Authors of the publication***

***Vladislav A. Novobritskiy*** – Irkutsk National Research Technical University.

***Denis S. Fedosov*** – Irkutsk National Research Technical University.

***Получено*** ***22.10.2021г.***

***Отредактировано*** ***29.10.2021г.***

***Принято*** ***29.10.2021г.***