

УДК 621.314.224.8

Роман Дмитриевич Айсин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», студент, Россия, Иваново, e-mail: aysin2003@mail.ru

Дмитрий Юрьевич Вихарев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», ассистент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Андрей Юрьевич Мурзин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, декан электроэнергетического факультета, Россия, Иваново, e-mail: murzin-64@mail.ru

Никита Андреевич Родин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Определение факта насыщения магнитопровода трансформатора тока на основе непрерывного измерения сопротивления цепи намагничивания

Авторское резюме

Состояние вопроса. Насыщение электромагнитных трансформаторов тока в переходных режимах работы электроэнергетической системы может приводить к неправильному действию устройств релейной защиты. Одним из наиболее перспективных направлений по повышению устойчивости функционирования устройств релейной защиты в таких режимах является цифровая коррекция вторичного тока. В настоящее время разработаны эффективные способы восстановления вторичного тока на основе определения факта насыщения магнитопровода. Однако практическое применение этих способов невозможно в силу несовершенства существующих методов сегментации вторичного тока. В соответствии с этим актуальной является задача разработки способа определения факта насыщения для реализации алгоритмов цифровой коррекции для электромагнитных трансформаторов тока.

Материалы и методы. Для решения сформулированной задачи использованы методы математического моделирования электрических цепей, содержащих трансформаторы, а также теория малых возмущений. Верификация результатов исследования проведена в программном комплексе Matlab.

Результаты. Сформулирован математический критерий для определения факта насыщения магнитопровода электромагнитного трансформатора тока на основе индуктивности цепи намагничивания. Разработан способ сегментации вторичного тока для реализации алгоритмов цифровой коррекции на основе предложенного критерия.

Выводы. Разработанный способ сегментации вторичного тока в части определения факта насыщения магнитопровода электромагнитного трансформатора тока с помощью вычислительных экспериментов в программном комплексе Matlab продемонстрировал свою эффективность. Планируется верификация разработанного способа на физической модели электромагнитного трансформатора тока.

Ключевые слова: трансформатор тока, насыщение магнитопровода, вторичный ток, коррекция вторичного тока, цепь намагничивания

Roman Dmitrievich Aysin

Ivanovo State Power Engineering University, Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: aysin2003@mail.ru

Dmitry Yurievich Vikharev

Ivanovo State Power Engineering University, Assistant of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dvikhareff@yandex.ru

Andrey Yurievich Murzin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of Electrical Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: murzin-64@mail.ru

Nikita Andreevich Rodin

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: nikita_iv_96@mail.ru

Determination of saturation of the magnetic circuit of current transformer based on continuous measurement of impedance of the magnetization circuit

Abstract

Background. Saturation of electromagnetic current transformers in transient modes of operation of an electric power system can lead to incorrect operation of relay protection devices. One of the most promising directions to improve the stability of the operation of relay protection devices in such modes is digital correction of secondary current. Currently, effective methods have been developed to restore the secondary current based on determination of magnetic circuit saturation. However, the practical application of these methods is impossible due to the imperfection of existing methods of secondary current segmentation. Thus, it is urgent to develop a method to determine saturation for implementation of digital correction algorithms for electromagnetic current transformers.

Materials and methods. To solve the stated problem, methods of mathematical modeling of electrical circuits containing transformers and the small-disturbance theory have been used. Verification of the research results is carried out in the Matlab software package.

Results. A mathematical criterion is formulated to determine the saturation of the magnetic circuit of an electromagnetic current transformer based on the inductance of the magnetization circuit. A method of segmentation of the secondary current has been developed for the implementation of digital correction algorithms based on the proposed criterion.

Conclusions. The effectiveness of the developed method to determine the saturation of the magnetic circuit of an electromagnetic current transformer using computational experiments in the Matlab software package is demonstrated. It is planned to verify the developed method using a physical model of an electromagnetic current transformer.

Key words: current transformer, magnetic circuit saturation, secondary current, secondary current correction, magnetization circuit

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.4.053-063

Введение. Трансформатор тока (ТТ) – измерительный аппарат, выполняющий функцию преобразования токов для включения измерительных устройств, приборов автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ) и устройств релейной защиты и автоматики (РЗА). На сегодняшний день электромагнитные ТТ повсеместно используются на электрических станциях и подстанциях.

Работа электромагнитного ТТ в пределах заданного класса точности обеспечивается выбором его параметров с учетом особенностей объекта проектирования. Корректный выбор типа ТТ и его характеристик должен обеспечивать устойчивое функционирование устройств РЗА в установившихся

и переходных режимах работы электроэнергетических систем (ЭЭС). Однако на практике распространены случаи неправильной работы устройств РЗА по причине насыщения магнитопровода ТТ¹. Основными причинами появления этого эффекта являются возникновение в первичном токе апериодических составляющих и высших гармоник при повреждениях в электрической сети и наличие остаточной намагниченности магнитопровода ТТ. В настоящее время самым эффективным способом повышения устойчивости функционирования устройств РЗА при насыщении является замена ТТ с предварительной оценкой времени до насыщения. Реализация такой меры сопровождается значительными эко-

¹ Письмо Министерства энергетики Российской Федерации от 2 апреля 2019 года № ЧА-3440/10 «О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты».

номическими затратами, связанными с монтажными и пуско-наладочными работами в схемах первичной и вторичной коммутаций.

Одним из наиболее перспективных направлений по исключению неправильной работы устройств РЗА является восстановление вторичного тока при насыщении магнитопровода ТТ. Микропроцессорное устройство РЗА с помощью специального алгоритма рассчитывает значение первичного тока по данным искаженного вторичного тока в режиме реального времени. При реализации способа восстановления не требуется замены первичного оборудования, что является его значительным преимуществом.

Существуют способы непрерывного восстановления вторичного тока, использующие характеристики магнитной системы ТТ [1–5]. Такой принцип компенсации погрешностей не может быть эффективно применен в условиях реальной эксплуатации по причине наличия остаточной намагниченности магнитопровода [1].

В настоящее время разработаны способы цифровой коррекции, не использующие параметры магнитопровода ТТ [6–9]. Для их реализации вводится понятие сегментации вторичного тока – выделения участков вторичного тока, соответствующих насыщению магнитопровода [1]. На основе этого принципа разработаны способы прогнозирования временной зависимости вторичного тока [6–8], алгоритм расчета первичного тока с помощью модели воздушного трансформатора [9]. Эффективность указанных способов цифровой коррекции зависит от точности сегментации вторичного тока.

В [1] сформулированы основные методы определения факта насыщения магнитопровода ТТ:

- 1) определение скорости изменения вторичного тока;
- 2) определение работы ТТ в линейном режиме.

Способ, относящийся к первой группе, основан на вычислении производной вторичного тока [10]. Известно, что при насыщении магнитопровода значение вторичного тока уменьшается практически до нуля за короткий промежуток времени [11]. Этот факт и фиксируют измерительные органы, применяющиеся в указанном способе.

Алгоритмы [12–14] основаны на анализе параметров гармонической составляющей промышленной частоты во вторичном

токе. Авторы ряда исследований [12, 13] приводят доказательства, что между ортогональными составляющими вторичного тока существует определенная математическая зависимость в линейном режиме работы ТТ. Несоответствие ортогональных составляющих этой функции является качественным признаком насыщения магнитопровода ТТ.

Отдельно можно выделить способ [15], отличающийся тем, что для определения факта насыщения магнитопровода ТТ используется катушка Роговского, осуществляющая измерение производной первичного тока. Известно, что при насыщении магнитной системы ТТ во вторичном токе появляются нечетные гармоники. Факт наличия высших гармоник во вторичном токе и их отсутствия в сигнале катушки Роговского является признаком насыщения магнитной системы.

Общим недостатком описанных способов является невозможность определения обратного перехода магнитной системы ТТ в линейный режим работы, что не позволяет использовать их для восстановления вторичного тока. В соответствии с этим актуальной является задача разработки метода определения факта насыщения магнитопровода.

Материалы и методы исследования. В соответствии с [11], процесс насыщения ТТ определяется параметрами ветви намагничивания классической схемы замещения трансформатора (рис. 1).

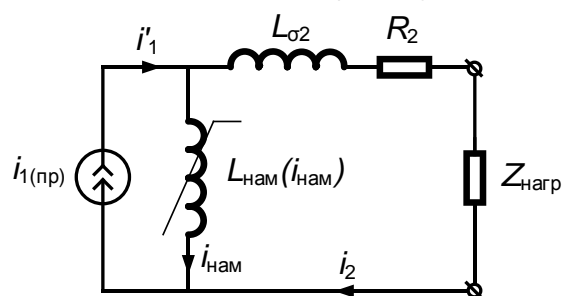


Рис. 1. Классическая электрическая схема замещения электромагнитного трансформатора тока

В первом приближении цепь намагничивания представляется проводником с нулевым сопротивлением в случае насыщения магнитопровода [11]. Однако экспериментальные исследования параметров ветви намагничивания показывают, что индуктивность ветви намагничивания $L_{\text{нам}}$ стремится к произведению числа витков

вторичной обмотки w_2 и коэффициента взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками M_{12} [16]. В таком случае схема замещения ТТ в режиме насыщения совпадает со схемой воздушного трансформатора (рис. 2).

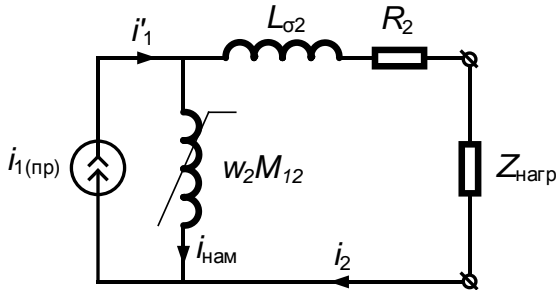


Рис. 2. Электрическая схема замещения электромагнитного трансформатора тока при насыщении магнитопровода

Результаты экспериментальных исследований позволяют сформулировать общий критерий для определения факта насыщения магнитопровода ТТ: при работе магнитной системы в нелинейном режиме индуктивность цепи намагничивания $L_{\text{нам}}$ в схеме замещения ТТ равна произведению числа витков вторичной обмотки w_2 и коэффициента взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками M_{12} . Осуществляя измерение индуктивности $L_{\text{нам}}$ в режиме реального времени, возможно определить факт насыщения ТТ.

Для непрерывного измерения индуктивности $L_{\text{нам}}$ предлагается включить последовательно в его вторичную цепь источник синусоидального напряжения. Электрическая схема предлагаемого измерения вторичной цепи ТТ представлена на рис. 3.

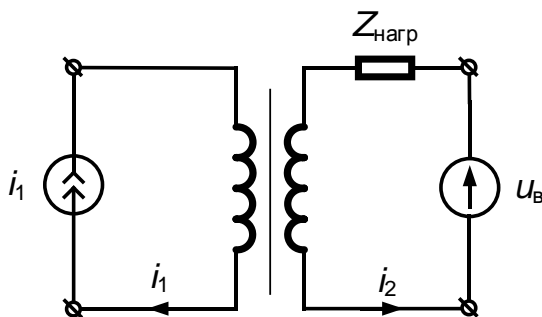


Рис. 3. Последовательное включение источника напряжения во вторичную цепь трансформатора тока

Физические процессы, протекающие во вторичной обмотке ТТ, описывает следующее уравнение [17]:

$$\begin{aligned} -M_{12} \frac{\partial i_1}{\partial t} - \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}(F)}{\partial t} + u_{\text{в}} = \\ = i_2 (R_2 + R_{\text{н}}) + (L_2 + L_{\text{н}}) \frac{\partial i_2}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где M_{12} – коэффициент взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками (без учета потокоцепления, обусловленного ферромагнитным сердечником); $\Psi_{2\text{ст}}$ – потокоцепление вторичной обмотки, обусловленное ферромагнитным сердечником; F – намагничивающая сила; R_2 – активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора; L_2 – индуктивность вторичной обмотки трансформатора (без учета потокоцепления, обусловленного ферромагнитным сердечником); $R_{\text{н}}$ – активное сопротивление нагрузки вторичной обмотки; L_2 – индуктивность нагрузки вторичной обмотки.

В соответствии с теорией малых возмущений величина напряжения источника $u_{\text{в}}$ должна стремиться к нулю, не вызывая тем самым изменений в режиме работы исследуемой нелинейной системы. В таком случае каждая электрическая величина может быть представлена в виде суммы следующего вида:

$$A = A_0 + \Delta A, \quad (2)$$

где A – временная зависимость электрической величины; A_0 – временная зависимость электрической величины при отсутствии возмущающего фактора; ΔA – отклонение значения электрической величины, вызванное наличием возмущающего фактора.

Выражение (2) позволяет преобразовать нелинейную функцию, входящую в состав уравнения (1), следующим образом:

$$\Psi_{2\text{ст}}(F) = \Psi_{2\text{ст}}(F_0 + \Delta F). \quad (3)$$

Разложение функции потокоцепления $\Psi_{2\text{ст}}$ в ряд Тейлора с учетом величины значения отклонения ΔF приводит к следующему выражению:

$$\Psi_{2\text{ст}}(F_0 + \Delta F) = \Psi_{2\text{ст}}(F_0) + \Delta F \left. \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}}{\partial F} \right|_{F_0}. \quad (4)$$

Общее уравнение, описывающее вторичную обмотку ТТ, можно преобразовать с учетом формул (2)–(4) к двум равенствам:

$$\begin{aligned} -M_{12} \frac{\partial i_{10}}{\partial t} - \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}(F_0)}{\partial t} = \\ = i_{20} (R_2 + R_{\text{н}}) + (L_2 + L_{\text{н}}) \frac{\partial i_{20}}{\partial t}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$-M_{12} \frac{\partial \Delta i_1}{\partial t} - \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}}{\partial F} \Big|_{F_0} \frac{\partial \Delta F}{\partial t} + u_B = \quad (6)$$

$$= \Delta i_2 (R_2 + R_H) + (L_2 + L_H) \frac{\partial \Delta i_2}{\partial t}.$$

Разделение одного выражения (1) на две части справедливо в контексте принятого определения (2), а именно по причине введения величины A_0 , изменение которой не определяется возмущающим источником.

Для упрощения выражения (6) предлагается ввести коэффициент трансформации, определяемый числом витков первичной и вторичной обмоток:

$$k_i = \frac{w_2}{w_1}. \quad (7)$$

Дифференциальное уравнение, описывающее временные зависимости отклонений электрических величин, преобразуется с учетом принятого определения (7) к виду

$$-\left(k_i M_{12} + \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}}{\partial F} \Big|_{F_0} \right) \frac{\partial \left(\frac{\Delta i_1}{k_i} + \Delta i_2 \right)}{\partial t} + u_B = \quad (8)$$

$$= \Delta i_2 (R_2 + R_H) + (L_2 - k_i M_{12} + L_H) \frac{\partial \Delta i_2}{\partial t}.$$

Необходимо отметить, что источник напряжения не может вызвать отклонения первичного тока Δi_1 , так как первичная цепь содержит источник тока. По этой причине выражение (8) упрощается до вида

$$-\left(k_i M_{12} + \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}}{\partial F} \Big|_{F_0} \right) \frac{\partial \Delta i_2}{\partial t} + u_B = \quad (9)$$

$$= \Delta i_2 (R_2 + R_H) + (L_2 - k_i M_{12} + L_H) \frac{\partial \Delta i_2}{\partial t}.$$

Выражение в скобках, стоящее в левой части уравнения (9), описывает индуктивность цепи намагничивания:

$$L_{\text{нам}}(F_0) = k_i M_{12} + \frac{\partial \Psi_{2\text{ст}}}{\partial F} \Big|_{F_0}. \quad (10)$$

Уравнение, описывающее изменение отклонений величин, имеет окончательный вид

$$u_B = \Delta i_2 (R_2 + R_H) + \quad (11)$$

$$+ (L_2 - k_i M_{12} + L_{\text{нам}}(F_0) + L_H) \frac{\partial \Delta i_2}{\partial t}.$$

Частное решение дифференциального уравнения (11) для синусоидальных величин выражается равенством для соответствующих комплексных амплитуд:

$$\dot{U}_B = \Delta i_2 (R_2 + R_H) + \quad (12)$$

$$+ j\omega_B (L_2 - k_i M_{12} + L_{\text{нам}}(F_0) + L_H) \Delta i_2,$$

где ω_B – круговая частота подаваемого синусоидального напряжения u_B .

С учетом отсутствия отклонения первичного тока Δi_1 и вида выражения (11) работа источника u_B описывается электрической схемой, изображенной на рис. 4.

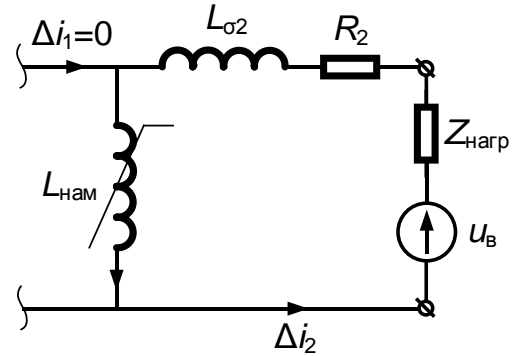


Рис. 4. Электрическая схема замещения для отклонений величин ΔA

Комплекс полного сопротивления на зажимах источника напряжения u_B рассчитывается в соответствии с выражением (12):

$$\underline{Z}_B = \frac{\dot{U}_B}{\Delta i_2} = (R_2 + R_H) + \quad (13)$$

$$+ j\omega_B (L_2 - k_i M_{12} + L_{\text{нам}}(F_0) + L_H).$$

При работе ТТ в пределах класса точности индуктивное сопротивление цепи намагничивания многократно превышает значение сопротивления оставшихся элементов. Тогда замер (13) примет следующий вид:

$$\underline{Z}_{B(\text{лин})} = \frac{\dot{U}_B}{\Delta i_2} \approx j\omega_B L_{\text{нам}}(F_0). \quad (14)$$

При насыщении магнитопровода индуктивность цепи намагничивания стремится к значению $k_i M_{12}$. В таком случае значение сопротивления на зажимах источника напряжения u_B рассчитывается следующим образом:

$$\underline{Z}_{B(\text{нас})} = \frac{\dot{U}_B}{\Delta i_2} = (R_2 + R_H) + j\omega_B (L_2 + L_H). \quad (15)$$

Для определения факта насыщения целесообразно использовать мнимую часть измеряемого комплекса сопротивления \underline{Z}_B .

Фиксация насыщения магнитопровода ТТ происходит при условии

$$\text{Im}(\underline{Z}_B) \leq k_i \omega_B (L_2 + L_H) = X_{\text{ср}}, \quad (16)$$

где $k_1 > 1$ – коэффициент, учитывающий точность определения значения собственной индуктивности вторичной обмотки ТТ L_2 и измерения отклонения вторичного тока Δi_2 ; $X_{ср}$ – параметр срабатывания измерительного органа способа определения факта насыщения магнитопровода ТТ.

Для измерения отклонения вторичного тока с частотой ω_b предлагается использовать дискретное преобразование Фурье. Необходимо отметить, что период подаваемого напряжения u_b должен быть меньше периода промышленной частоты, так как насыщение происходит только на определенных участках вторичного тока. С точки зрения быстроты определения факта насыщения магнитопровода ТТ период подаваемого напряжения также должен быть как можно меньше по своему значению. Таким образом, подаваемый сигнал можно назвать высокочастотным.

Функционирование описанного способа в реальном времени представлено на рис. 5. При насыщении магнитопровода индуктивность цепи намагничивания $L_{нам}$ уменьшается до значения $k_1 M_{12}$, что приводит к увеличению величины отклонения вторичного тока Δi_2 . Орган минимального действия фиксирует уменьшение мнимой части

комплексного сопротивления Z_b на зажимах источника u_b ниже уровня $X_{ср}$, необходимого для срабатывания.

Разработанный способ определения факта насыщения имеет ряд преимуществ с теоретической точки зрения:

1) универсальность (метод определения факта насыщения не основывается на определенном виде функции, описывающей временную зависимость первичного тока);

2) быстродействие (время, необходимое для определения факта насыщения, ограничивается периодом подаваемого высокочастотного сигнала);

3) возможность определения границ временного интервала, в течение которого магнитная система ТТ работает в нелинейном режиме.

При включении источника высокочастотного сигнала во вторичную цепь во вторичном токе возникнут высшие гармоники, которые могут приводить к неправильному функционированию устройств релейной защиты и трансформатора тока. Для предотвращения негативного влияния со стороны включаемого источника его параметры должны рассчитываться в соответствии со следующими положениями.

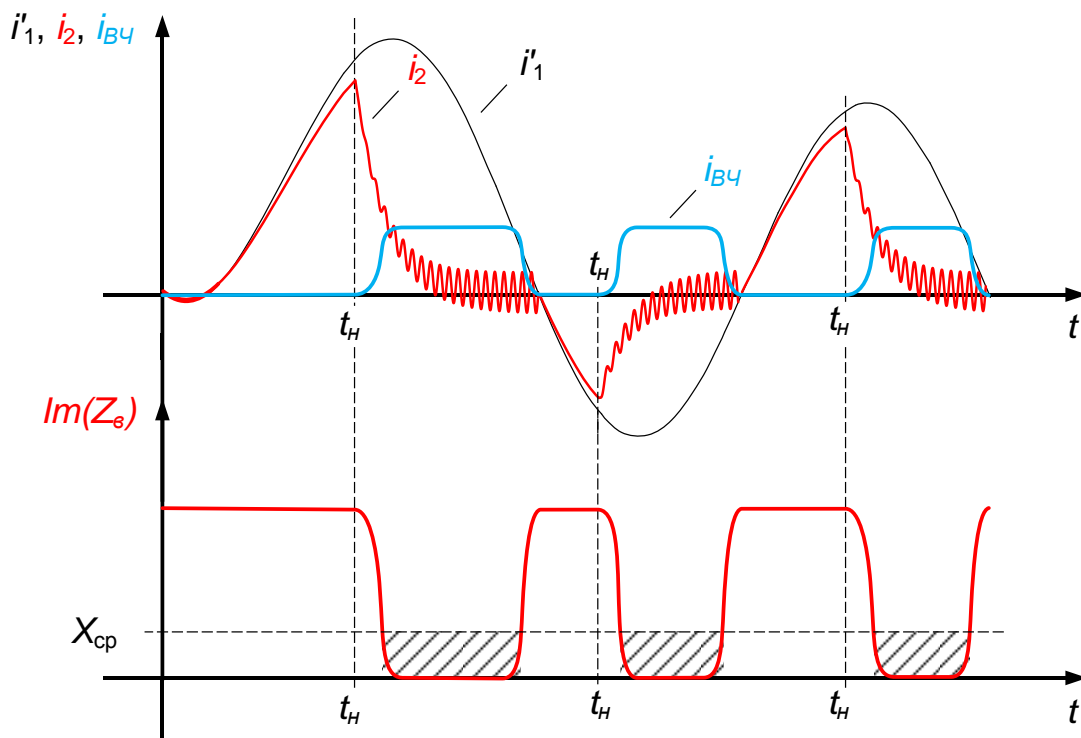


Рис. 5. Функционирование способа определения факта насыщения магнитопровода ТТ на основе непрерывного изменения индуктивности цепи намагничивания

1. *Частота подаваемого сигнала* f_b . В современных микропроцессорных устройствах релейной защиты измерительные каналы снабжены аналоговыми фильтрами низких частот [18]. Частота среза таких фильтров выбирается таким образом, чтобы измеряемый сигнал удовлетворял требованиям теоремы Котельникова:

$$f_d > 2f_c, \quad (17)$$

где f_d – частота дискретизации сигнала; f_c – максимальная частота в спектре исследуемого сигнала.

Частота дискретизации сигнала в целях релейной защиты и автоматики определяется и выбирается из следующих значений: 24 отсчета (1200 Гц); 48 отсчетов (2400 Гц); 96 отсчетов (4800 Гц) на период промышленной частоты². В соответствии с выражением (17), частота подаваемого сигнала f_b должна быть больше половины максимальной частоты дискретизации, т. е. $f_b > 2400$ Гц. Выбор частоты в таком интервале позволит избежать влияния высокочастотной составляющей на работу микропроцессорного терминала релейной защиты.

С точки зрения быстродействия частота подаваемого сигнала f_b должна быть как можно больше, так как дискретное преобразование Фурье осуществляется на периоде исследуемого сигнала.

2. *Амплитуда подаваемого сигнала* U_b . Включение высокочастотного источника во вторичную цепь ТТ приведет к появлению высших гармоник во вторичном токе. В ГОСТ не регламентирован уровень высших гармоник, при которых ТТ может работать в условиях реальной эксплуатации³, аналогичные требования отсутствуют и в международных стандартах⁴. В государственных стандартах о качестве электрической энергии существуют требования к уровню гармонических составляющих напряжения, для тока соответствующие требования отсутствуют⁵.

В международном стандарте регламентирован уровень высших гармоник в первичном токе в электрических сетях⁶. Допустимое значение амплитуды гармонической составляющей зависит от ее частоты,

номинального напряжения электрической сети, соотношения максимального значения тока короткого замыкания и нагрузочного тока. Минимально допустимый уровень четной гармоники с частотой, превышающей значение 2160 Гц, в первичном токе составляет 0,1 % по отношению к номинальному току оборудования. По причине отсутствия аналогичных требований в отечественных стандартах предлагается ориентироваться на это значение как на максимально допустимый уровень высших гармоник в первичном токе, при котором первичное оборудование может работать в номинальном режиме.

В соответствии с принятым требованием, в номинальном режиме работы электрической сети действующее значение напряжения высокой частоты U_b должно удовлетворять условию

$$I_{вч} = \frac{U_b}{Z_{в(лин)}} = \frac{U_b}{\omega_b L_{нам(лин)}} \leq 10^{-3} I_{2ном}, \quad (18)$$

где $I_{2ном}$ – номинальный вторичный ток ТТ.

Действующее значение напряжения высокой частоты U_b с учетом неравенства (18) должно выбираться из диапазона

$$U_b \leq 10^{-3} I_{2ном} \omega_b L_{нам(лин)}. \quad (19)$$

Таким образом, частота подаваемого напряжения f_b и действующее значение сигнала U_b выбираются с учетом следующих неравенств:

$$f_b > \frac{f_d}{2}; \quad (20)$$

$$U_b \leq 10^{-3} I_{2ном} \omega_b L_{нам(лин)}. \quad (21)$$

3. *Параметры срабатывания измерительного органа*. Выражение (16) определяет значение параметра срабатывания $X_{ср}$ измерительного органа:

$$X_{ср} = k_1 \omega_b (L_2 + L_n). \quad (22)$$

Значение коэффициента k_1 принимается равным 1,3.

Результаты исследования. Для анализа функционирования способа определения факта насыщения магнитопровода раз-

² СТО 56947007-29.120.70.241-2017. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА.

³ ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

⁴ C57.13-2016 - IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers.

⁵ ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

⁶ IEEE Std 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems.

работана математическая модель трансформатора тока ТВ-110 в программном комплексе Matlab/Simulink. Основным элементом математической модели является блок Nonlinear Transformer, параметры которого представлены в таблице.

Параметры блока Nonlinear Transformer

Наименование параметра в Matlab/Simulink	Значение	Единицы измерения
Primary number of turns	1	шт.
Secondary number of turns	100	шт.
Winding parameterized by	Раздельные значения для первичной и вторичной обмоток	–
Primary leakage resistance	10	МОм
Primary leakage inductance	0,1	мГн
Secondary leakage resistance	445	МОм
Secondary leakage inductance	1,9	мГн
Magnetization resistance	100	кОм
Effective length	1,38	м
Effective cross-sectional area	80	см ²
Interpolation option	Линейный	–

Нагрузку вторичной обмотки трансформатора тока в математической модели реализует блок Resistance, значение моделируемого сопротивления которого принято равным 1,2 Ом.

Индуктивность цепи намагничивания трансформатора тока ТВ-110 в номинальном режиме работы рассчитывается в соответствии с выражением [17]

$$L_{\text{нам(лин)}} = \frac{w_2^2 S}{l} \frac{\partial B}{\partial H} \Big|_{H=0} = 100 \text{ мГн.} \quad (23)$$

Принимается, что частота дискретизации сигнала устройством РЗА равна 4800 Гц. Частота сигнала, генерируемого источником, выбирается равной 5000 Гц, в соответствии с (20).

Действующее значение высокочастотного напряжения рассчитывается в соответствии с выражением (21):

$$U_B = 10^{-3} I_{2\text{ном}} \omega_B L_{\text{нам(лин)}} = 16 \text{ В,} \quad (24)$$

где $I_{2\text{ном}}$ – номинальный ток трансформатора тока ТВ-110 (5 А).

Для анализа функционирования способа в переходных режимах работы сети, сопровождающихся увеличением периодической составляющей первичного тока до значения тока предельной кратности 12500 А и наличием аperiodической составляющей с максимальным начальным значением, проведен вычислительный эксперимент, результаты которого представлены на рис. 6, 7.

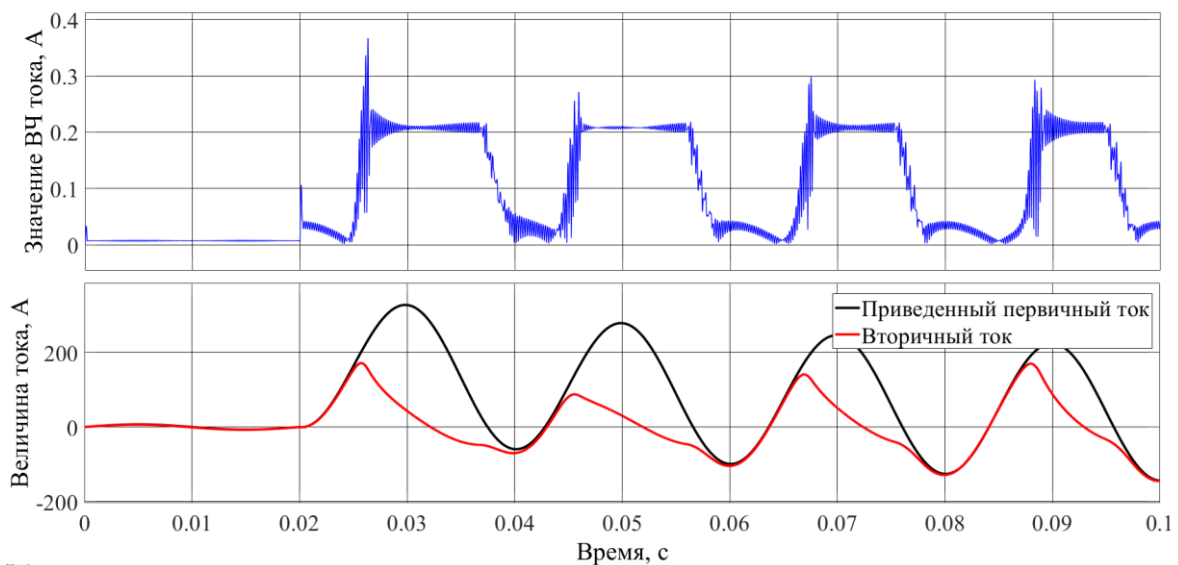


Рис. 6. Временная зависимость амплитудного значения высокочастотного тока при повреждениях в первичной сети, сопровождающихся увеличением периодической составляющей первичного тока до значения тока предельной кратности 12500 А с максимальным значением аperiodической составляющей

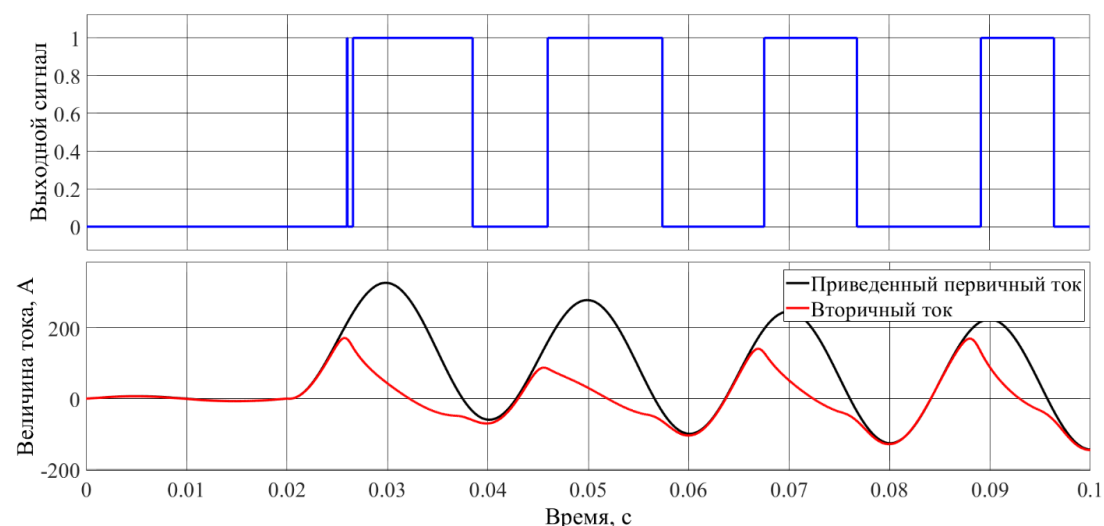


Рис. 7. Определение факта насыщения при повреждениях в первичной сети, сопровождающихся увеличением периодической составляющей первичного тока до значения тока предельной кратности 12500 А с максимальным значением аperiodической составляющей

Математическое моделирование алгоритма на основе непрерывного измерения индуктивности цепи намагничивания показало эффективность определения факта насыщения магнитопровода ТТ в переходных и установившихся режимах работы электрической сети. Отличительной чертой разработанного метода является возможность определения границ временного интервала, в течение которого магнитопровод ТТ работает в нелинейном режиме.

Выводы. Сформулированный общий критерий для определения факта насыщения магнитопровода ТТ гласит: при работе магнитной системы в нелинейном режиме индуктивность цепи намагничивания $L_{\text{нам}}$ в схеме замещения ТТ равна произведению числа витков вторичной обмотки w_2 и коэффициента взаимной индукции между первичной и вторичной обмотками M_{12} .

Разработанный метод определения факта насыщения магнитопровода трансформатора тока на основе непрерывного измерения индуктивности цепи намагничивания предполагает включение во вторичную цепь источника высокочастотного сигнала и измерение высших гармоник во вторичном токе.

Описанная методика выбора параметров срабатывания измерительных органов, определяющих нелинейный режим работы, и характеристик высокочастотного источника продемонстрировала эффективность разработанного способа в решении задачи сегментации вторичного тока на основе математической модели блока трансформатора

тока ТВ-110 в программном комплексе Matlab/Simulink.

Список литературы

1. Кужеков С.Л., Дегтярев А.А., Сербинский Б.Б. Анализ способов восстановления информации о первичном токе трансформатора тока, работающего с насыщением сердечника // Релейная защита и автоматизация. – 2017. – № 3(28). – С. 43–51.
2. Пат. № 2644406 С1 Российская Федерация МПК H01F 27/42, H01F 38/28. Способ восстановления приведенного первичного тока трансформатора тока в переходном режиме: № 2016145188: заявл. 17.11.2016: опубл. 12.02.2018 / А.Д. Рыбалкин, А.А. Шурупов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью научно-производственное предприятие «ЭКРА».
3. Пат. № 2748217 С1 Российская Федерация МПК H02H 3/08, H02H 7/045, G01R 15/18. Способ восстановления тока, искаженного вследствие насыщения трансформатора тока: № 2020128449: заявл. 26.08.2020: опубл. 21.05.2021 / Ю.Я. Лямец, И.Ю. Никонов, И.Е. Петряшин; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Релематика».
4. Пат. № 2683999 С1 Российская Федерация МПК G01R 19/00, G01R 33/12. Способ цифровой коррекции эффекта насыщения магнитопровода трансформатора тока: № 2018107699: заявл. 02.03.2018: опубл. 03.04.2019 / С.О. Алексинский, А.С. Алексинский; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «СИНГЛТОН».
5. Усовершенствованный алгоритм расчета переходного вторичного тока трансформатора тока / Е.Д. Березкин, Н.А. Дони, И.А. Ермолкин и др. // Цифровая электротехника: проблемы и

достижения: сб. науч. тр. НПП «ЭКРА». – Чебоксары: Рекламно-издательский центр «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управлению в электроэнергетике», 2018. – С. 21–31.

6. **Лямец Ю.Я., Никонов И.Ю., Петряшин И.Е.** Восстановление тока, искаженного вследствие насыщения трансформатора тока, по малому числу отсчетов // Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики: материалы науч.-техн. конф. молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО-2021», Чебоксары, 20–22 апреля 2021 г. – Чебоксары: Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, 2021. – С. 95–99.

7. **Кужеков С.Л., Дегтярев А.А.** О восстановлении периодической составляющей первичного тока трансформатора тока в переходном режиме // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2011. – № 3. – С. 29–31.

8. **Рыбалкин А.Д., Шурупов А.А., Ермолкин И.А.** Прогнозирование тока короткого замыкания при насыщении магнитопровода трансформатора тока // Цифровая электротехника: проблемы и достижения: сб. науч. тр. НПП «ЭКРА». – Чебоксары: Рекламно-издательский центр «Содействие развитию релейной защиты, автоматики и управления в электроэнергетике», 2016. – С. 55–65.

9. **Вихарев Д.Ю., Родин Н.А.** Алгоритм восстановления приведенного первичного тока при насыщении электромагнитного трансформатора тока без использования характеристики намагничивания // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2022. – № 6. – С. 36–45. DOI: 10.31857/S0002331022060061. – EDN AGKYMV.

10. **Evans F.J., Wells G.** Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current Transformers // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1970. – Vol. 19, Issue 3. – P. 144–147.

11. **Королев Е.П., Либерзон Э.М.** Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Энергия, 1980. – 207 с.

12. **Зиновьев Д.В.** Развитие теории информационного анализа процессов в электрических системах и ее приложение к релейной защите: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 20.02.02. – Чебоксары, 2009. – 23 с.

13. **Пат. № 2316870 С1** Российская Федерация МПК H02H 3/38, G01R 31/02. Способ определения интервалов однородности электрической величины: № 2006123893: заявл. 03.07.2006: опубл. 10.02.2008 / Д.В. Зиновьев, Ю.Я. Лямец, Ю.В. Романов; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Исследовательский центр “Бреслер”».

14. **Мыльников В.А.** Исследования и разработка методов повышения точности определения места короткого замыкания на высоковольтных линиях 110–220 кВ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. – Иваново, 2002. – 22 с.

15. **Пат. № 2674580 С1** Российская Федерация МПК G01R 33/12. Способ определения насыщения магнитопровода трансформатора тока: № 2017146199: заявл. 27.12.2017: опубл. 11.12.2018 / В.Д. Лебедев, А.Е. Евдаков, С.Н. Литвинов, А.В. Гусенков; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

16. **Вихарев Д.Ю., Родин Н.А.** Экспериментальное определение индуктивности цепи намагничивания электромагнитного трансформатора при насыщении магнитопровода // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 июня 2023 г. (XXII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2023. – Т. 3. – С. 397–404. – EDN GQACBT.

17. **Вихарев Д.Ю.** Повышение устойчивости функционирования устройства релейной защиты при насыщении трансформаторов тока / Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, электроэнергетический факультет, кафедра автоматического управления электроэнергетическими системами. – Иваново, 2022. – 115 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=690905>.

18. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 548 с.

References

1. Kuzhekov, S.L., Degtyarev, A.A., Serbinovskiy, B.B. Analiz sposobov vosstanovleniya informatsii o pervichnom toke transformatora toka, rabotayushchego s nasyshcheniem serdechnika [Analysis of the methods of restoring information on the primary current of a current transformer upon saturation of its core]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2017, no. 3(28), pp. 43–51.

2. Rybalkin, A.D., Shurupov, A.A. *Sposob vosstanovleniya privedonnogo pervichnogo toka transformatora toka v perekhodnom rezhime* [Method of reduced primary current recovery of current transformer in transient mode]. Patent RF, no. 2644406, 2018.

3. Lyamets, Yu.Ya., Nikonov, I.Yu., Petryashin, I.E. *Sposob vosstanovleniya toka, iskazhennogo vsledstvie nasyshcheniya transformatora toka* [Method for restoring current distorted due to saturation of current transformer]. Patent RF, no. 2748217, 2021.

4. Aleksinskiy, S.O., Aleksinskiy, A.S. *Sposob tsifrovoy korrektsii effekta nasyshcheniya magnitoprovoda transformatora toka* [Method for digital correction of effect of current transformer mechanical saturation]. Patent RF, no. 2683999, 2019.

5. Berezkin, E.D., Doni, N.A., Ermolkin, I.A., Prosviryakova, T.S., Rybalkin, A.D., Shurupov, A.A. *Usovershenstvovannyi algoritm rascheta perekhodnogo*

vtorichnogo toka transformatora toka [Improved transmitter current transformer current calculation algorithm for analysis of relay protection devices]. *Sbornik nauchnykh trudov NPP «EKRA» «Tsifrovaya elektrotehnika: problemy i dostizheniya»* [Proceedings of Research and Production Enterprise “EKRA” “Digital electrical engineering: problems and achievements”]. Cheboksary: Reklamno-izdatel'skiy tsentr «Sodeystvie razvitiyu releynoy zashchity, avtomatiki i upravleniyu v elektroenergetike», 2018, pp. 21–31.

6. Lyamets, Yu.Ya., Nikonov, I.Yu., Petryashin, I.E. Vosstanovlenie toka, iskazhennogo vsledstvie nasyscheniya transformatora toka, po malomu chislu otschetov [Reconstruction of the current distorted due to saturation of the current transformer from a small number of readings]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov v ramkakh foruma «RELAVEKSP0-2021» «Sovremennye tendentsii razvitiya tsifrovyykh sistem releynoy zashchity i avtomatiki»*, Cheboksary, 20–22 aprelya 2021 goda [Materials of the scientific and technical conference of young specialists within the framework of the RELAVEXPO-2021 forum “Modern trends in the development of digital relay protection and automation systems”]. Cheboksary, 2021, pp. 95–99.

7. Kuzhekov, S.L., Degtyarev, A.A. O vosstanovlenii periodicheskoy sostavlyayushchey pervichnogo toka transformatora toka v perekhodnom rezhime [On the restoration of the periodic component of the primary current of a current transformer in transient mode]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2011, no. 3, pp. 29–31.

8. Rybalkin, A.D., Shurupov, A.A., Ermolkin, I.A. Prognozirovaniye toka korotkogo замыканиya pri nasyschenii magnitoprovoda transformatora toka [Prediction of short circuit current when the magnetic wire of a current transformer is saturated]. *Sbornik nauchnykh trudov NPP «EKRA» «Tsifrovaya elektrotehnika: problemy i dostizheniya»* [Collection of scientific works of the EKRA Research and Production Enterprise “Digital electrical engineering: problems and achievements”]. Cheboksary: Reklamno-izdatel'skiy tsentr «Sodeystvie razvitiyu releynoy zashchity, avtomatiki i upravleniya v elektroenergetike», 2016, pp. 55–65.

9. Vikharev, D.Yu., Rodin, N.A. Algoritm vosstanovleniya privedennogo pervichnogo toka pri nasyschenii elektromagnitnogo transformatora toka bez ispol'zovaniya kharakteristiki namagnichivaniya [Algorithm for restoring the reduced primary current in case of saturation of the electromagnetic current transformer without using the saturation curve]. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika*, 2022, no. 6, pp. 36–45. DOI: 10.31857/S0002331022060061. EDN AGKYMW.

10. Evans, F.J., Wells, G. Use of Sampling to Detect Transient Saturation in Protective Current

Transformers. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1970, vol. 19, issue 3, pp. 144–147.

11. Korolev, E.P., Liberzon, E.M. *Raschety dopustimyykh nagruzok v tokovykh tsepyakh releynoy zashchity* [Calculations of permissible loads in current circuits of relay protection]. Moscow: Energiya, 1980. 207 p.

12. Zinov'ev, D.V. *Razvitie teorii informatsionnogo analiza protsessov v elektricheskikh sistemakh i ee prilozhenie k releynoy zashchite*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 20.02.02 [Development of the theory of information analysis of processes in electrical systems and its application to relay protection. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Cheboksary, 2009. 23 p.

13. Zinov'ev, D.V., Lyamets, Yu.Ya., Romanov, Yu.V. *Sposob opredeleniya intervalov odnorodnosti elektricheskoy velichiny* [Method for determining homogeneity intervals of an electric value]. Patent RF, no. 2316870, 2008.

14. Myl'nikov, V.A. *Issledovaniya i razrabotka metodov povysheniya tochnosti opredeleniya mesta korotkogo замыканиya na vysokovol'tnykh liniyakh 110–220 kV*. Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: 05.14.02 [Research and development of methods for increasing the accuracy of determining the location of a short circuit on high-voltage lines 110–220 kV. Abstr. cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2002. 22 p.

15. Lebedev, V.D., Evdakov, A.E., Litvinov, S.N., Gusenkov, A.V. *Sposob opredeleniya nasyscheniya magnitoprovoda transformatora toka* [Method for determining the saturation of the magnetic circuit of a current transformer]. Patent RF, no. 2674580, 2018.

16. Vikharev, D.Yu., Rodin, N.A. Eksperimental'noe opredelenie induktivnosti tsepi namagnichivaniya elektromagnitnogo transformatora pri nasyschenii magnitoprovoda [Experimental determination of the inductance of the magnetization circuit of an electromagnetic transformer when the magnetic circuit is saturated]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplotekhnologii» (XXII Benardosovskie chteniya)*, Ivanovo, 31 maya – 02 iyunya 2023 goda [Proceedings of International scientific-technical conference “State of the art and prospects of development of electrical and thermal technology”, dedicated to the 75th anniversary of the Faculty of Thermal Power Engineering, Ivanovo, May 31 – June 2, 2023 (XXII Benardos Readings)]. Ivanovo, 2023, pp. 397–404.

17. Vikharev, D.Yu. *Povyshenie ustoychivosti funktsionirovaniya ustroystva releynoy zashchity pri nasyschenii transformatorov toka* [Increasing the stability of the functioning of a relay protection device when current transformers are saturated]. Ivanovo, 2022. 115 p.

18. Shneerson, E.M. *Tsifrovaya releynaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 548 p.