

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.316

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Денис Геннадьевич Григорьев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Анализ частотных характеристик токовых датчиков цифрового трансформатора тока и напряжения

Авторское резюме

Состояние вопроса. Источниками информации о процессах на современных цифровых подстанциях являются цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения, имеющие в своем составе различные датчики тока и напряжения. В качестве датчиков тока в цифровых измерительных трансформаторах тока и напряжения применяются классические малогабаритные трансформаторы тока, катушки Роговского, магнитотранзисторные датчики, датчики на эффекте Холла, волоконно-оптические датчики на эффекте Фарадея, а также шунты. В целях резервирования токовые каналы выполняются в нескольких экземплярах и на различных датчиках. Различные по своей природе датчики обладают определенным набором преимуществ, что в сумме позволяет получить эффект устранения недостатков конкретных датчиков. Так, например, они могут не иметь эффекта насыщения и довольно точно передавать постоянную составляющую тока, что является значительным преимуществом перед классическими трансформаторами тока. Поведение этих датчиков является довольно предсказуемым на частоте сети, однако их поведение на высших и низших частотах изучено недостаточно. В связи с этим необходимо исследовать АЧХ и ФЧХ данных датчиков в широком частотном диапазоне.

Материалы и методы. Для решения задач, поставленных в рамках данного исследования, использованы физический эксперимент, аналитические и эмпирические методы решения.

Результаты. Получены АЧХ и ФЧХ токовых датчиков цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения в широком частотном диапазоне. Спроектирован аналоговый фильтр для коррекции сигнала с магнитотранзисторного датчика.

Выводы. Полученные результаты совпадают с теоретическими данными и могут быть учтены при разработке цифровых алгоритмов РЗА.

Ключевые слова: частотные характеристики, измерительные трансформаторы тока, цифровые трансформаторы тока

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor, Head of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-04, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Denis Gennadievich Grigoriev

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Automatic Control of Electrical Power Systems Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-04, e-mail: denis.grigorev@mail.ru

Analysis of frequency-dependent characteristics of digital current and voltage transformer current sensors

Abstract

Background. Digital measuring current and voltage transformers (DCVT), which incorporate various current and voltage sensors are the key sources of information about processes at modern digital substations. Classic small-sized current transformers, Rogowski coils, magnetotransistor sensors, Hall effect sensors, fiber-optic Faraday effect sensors, as well as shunts can be used as current sensors in DCVTs. For redundancy purposes, current channels are performed in several copies and on different sensors. Sensors that are different in nature have their own set of advantages, which together makes it possible to obtain the effect of eliminating the shortcomings of specific sensors. For example, they may not have a saturation effect or transmit the direct current component quite accurately, which is a significant advantage over classic current transformers. At the mains frequency, the behavior of these sensors is predictable, but their behavior is not well studied at higher and lower frequencies. Thus, it is decided to study the frequency response and phase response of these sensors in a wide frequency range.

Materials and methods. To solve the problems within the framework of this study, physical experiment, analytical and empirical solution methods have been used.

Results. As a result of the study, the frequency response and phase response of current sensors of DCVT in a wide frequency range have been obtained. Analog filter has been designed to correct the signal of the magnetotransistor sensor.

Conclusions. The results obtained coincide with theoretical data and can be considered when developing digital relay protection and automation algorithms.

Key words: frequency characteristics, measuring current transformers, digital current transformers

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.3.029-038

Введение. Цифровые трансформаторы тока (ЦТТ) являются логическим продолжением развития классических трансформаторов тока с учетом внедрения цифровых технологий. В последнее время появляется все больше стандартов на ЦТТ¹, которые представляют собой переработанные стандарты для классических измерительных трансформаторов², но с учетом новых требований и условий. Так, напри-

мер, в стандарте³ присутствует требование к применению немагнитных сердечников у измерительных датчиков ЦТТ, что исключает применение классических трансформаторов тока (ТТ). Отсутствие намагничивания и гистерезиса сердечников приводит к отсутствию ряда проверок, присущих классическим ТТ.

В настоящее время в опытной эксплуатации на ПС Тобол находятся цифровые трансформаторы фирмы «Профотек», основанные на применении эффекта Фарадея, что является демонстрацией цифровизации электроэнергетического комплекса с применением современных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения (ЦТТН). В рамках настоящего исследования были рассмотрены

¹ ГОСТ Р МЭК 60044-8-2010. Трансформаторы измерительные. Ч. 8. Электронные трансформаторы тока; СТО 34.01-3.2-017-2022. Цифровые трансформаторы тока 6–750 кВ. Общие технические условия. Стандарт организации.

² ГОСТ ИЕС 60044-1-2013. Трансформаторы измерительные. Ч. 1. Трансформаторы тока; ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015. Трансформаторы измерительные. Ч. 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока; ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.

³ СТО 34.01-3.2-017-2022. Цифровые трансформаторы тока 6–750 кВ. Общие технические условия. Стандарт организации.

другие виды датчиков для доказательства их пригодности и дальнейшего потенциального внедрения.

Одним из требований к измерительным преобразователям является наличие у них линейной АЧХ и ФЧХ. В релейной защите находят место защиты, реагирующие на высшие гармонические составляющие. Задача оценки качества электроэнергии так же требует измерения гармоник в широком частотном диапазоне, поэтому поиск новых линейных датчиков обусловлен рядом задач, для решения которых они будут полезны.

Переход на новые измерительные датчики, кроме вышеуказанных преимуществ, влечет за собой ряд проблем. В литературе можно найти упоминания АЧХ и ФЧХ классических ТТ и ТН в широком диапазоне частот [1, 2]. В отличие от них, новые преобразователи на данный момент не получили достаточного внимания из-за малой степени их внедрения в производство. Наличие в них еще не выявленных эффектов, которые искажают АЧХ или ФЧХ в ограниченной области частот, может приводить к неправильным измерениям, что недопустимо. Следовательно, появляется необходимость для изучения АЧХ и ФЧХ датчиков в целях доказательства предсказуемости их частотных характеристик.

В литературе имеются примеры измерения АЧХ и ФЧХ катушек Роговского (КР) [3–5] или указаны диапазоны линейности [6], а также АЧХ и ФЧХ делителя напряжения и системы «катушка Роговского + интегратор» [7], но информация о магнитотранзисторных датчиках (МТ) и датчиках на эффекте Холла (ДХ) отсутствует. Наличие данных по подобным датчикам позволит применять их для измерения электроэнергии и РЗиА, в связи с чем было принято решение провести исследования частотных характеристик датчиков.

Рассмотрим развитие теории практического применения цифровых измерительных трансформаторов тока, разработанных в ИГЭУ совместно с ООО НПО «ЦИТ». Датчиковая система цифрового измерительного трансформатора тока [8] упрощенно представлена на рис. 1 и состоит из классического трансформатора тока, катушки Роговского и магнитотранзисторного датчика. Последние два датчика не имеют эффекта насыщения, поэтому имеют хорошие перспективы применения для целей релейной защиты.

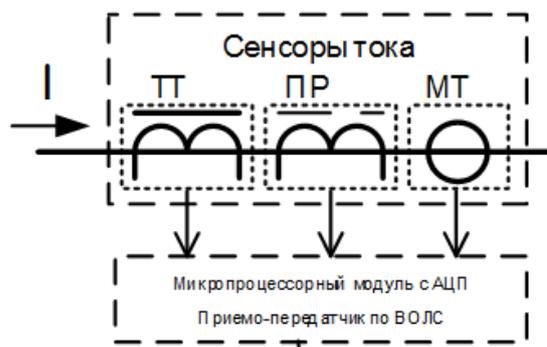


Рис. 1. Структура измерительной части цифрового трансформатора тока

Использование нескольких датчиков открывает перспективы создания новых алгоритмов обработки сигналов. Например, в [9] представлен алгоритм быстрого получения вектора сигнала при допущении об идеальности датчиков тока по шумовым и частотным характеристикам. В литературе имеются сведения о частотных свойствах классического трансформатора тока и катушки Роговского, применяемых в рассматриваемых образцах цифровых трансформаторов тока. Однако кроме вышеуказанных датчиков в ЦТТН используются специально разработанные малогабаритные датчики, частотные свойства которых необходимо исследовать.

Частотные свойства наматываемых датчиков тока (трансформатора тока и катушки Роговского) обусловлены наличием распределенных индуктивностей обмотки и межвитковых емкостей. Например, схема замещения электромагнитного трансформатора с емкостями [10] представлена на рис. 2, но в данной схеме для упрощения не показаны межвитковые емкости.

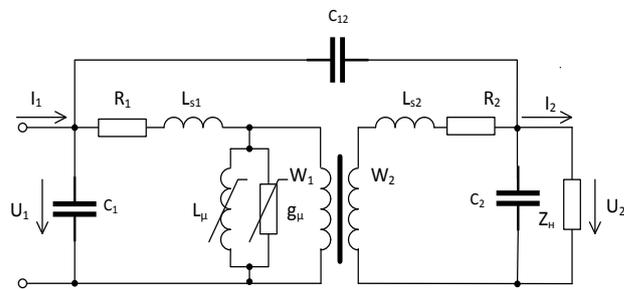


Рис. 2. Схема замещения электромагнитного трансформатора

Варианты схемы замещения обмотки катушки Роговского представлены на рис. 3.

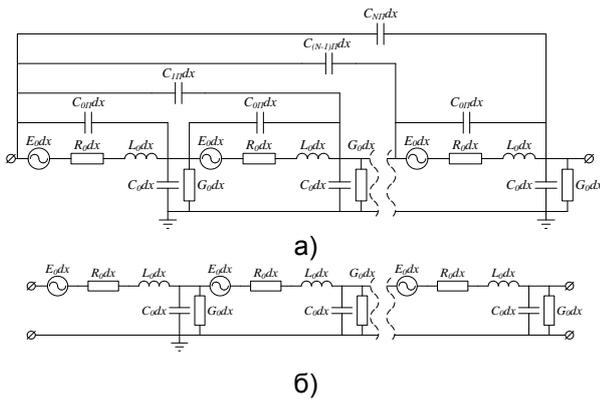


Рис. 3. Схемы замещения катушки Роговского: а – с продольными и межвитковыми емкостями и поперечными потерями; б – упрощенная схема замещения

Частотные зависимости трансформатора тока и катушки Роговского могут быть получены аналитическим методом, например для схемы рис. 3,б методом решения волнового уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R_0 \left(G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) + L_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(G_0 u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \right) -$$

$$-\frac{\partial E_0}{\partial x} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (R_0 C_0 + L_0 G_0) \frac{\partial u}{\partial t} +$$

$$+ R_0 G_0 u + \left(-\frac{\partial E_0}{\partial x} \right). \quad (1)$$

Следует отметить высокую сложность и трудоемкость определения параметров обмоточных датчиков и использования их в математических моделях, построенных на сложных математических зависимостях (например, уравнении (1)). Электронные датчики на основе магнитотранзисторов и датчиков Холла также обладают достаточной сложностью для получения расчетных параметров схем замещения для анализа частотных свойств.

Таким образом, было принято решение выполнить экспериментальные исследования первичных измерительных преобразователей цифрового трансформатора тока.

Испытательная установка и методика проведения эксперимента. При исследовании частотных характеристик датчиков тока возникает необходимость в поиске прецизионного источника тока и измерительного оборудования. От их выбора зависит достоверность результата. В качестве источника тока в данном эксперименте выступает связка программно-аппаратного комплекса системы модели-

рования реального времени (ПАК RTDS) и четырехквadrантного усилителя мощности Ponovo PAV5000. Согласно паспортным данным, выходная характеристика PAV5000 ограничена 5 кГц, однако в рамках выполненных экспериментов были получены сигналы тока с уменьшенной вплоть до частоты 50 кГц амплитудой. В качестве измерительного осциллографирующего оборудования были использованы приборы NI SCXI-1327/1600, Keysight 3458A и осциллограф Tektronix TBS2000. Основываясь на результатах предварительных экспериментов, был выбран осциллограф Tektronix TBS2000, имеющий наиболее приемлемую точность для данной задачи, а также прецизионный безындукционный шунт ШЭ-5,0 производства ООО «НПП Марс-Энерго» с номинальным током до 5 А и рабочим частотным диапазоном от 0 до 100 кГц. Определение АЧХ и ФЧХ происходит путем сравнения результатов с прецизионного шунта и измерительного датчика. Поскольку ток в 5 А является относительно малым по сравнению с номинальными токами исследуемых экспериментальных образцов датчиков тока, для нормировки сигнала при проведении экспериментов на датчики дополнительно наматывается первичная обмотка для доведения параметра ампер-витков до 450–550. Напряжение с прецизионного шунта конвертируется в ток с учетом числа ампер-витков на проверяемом датчике. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

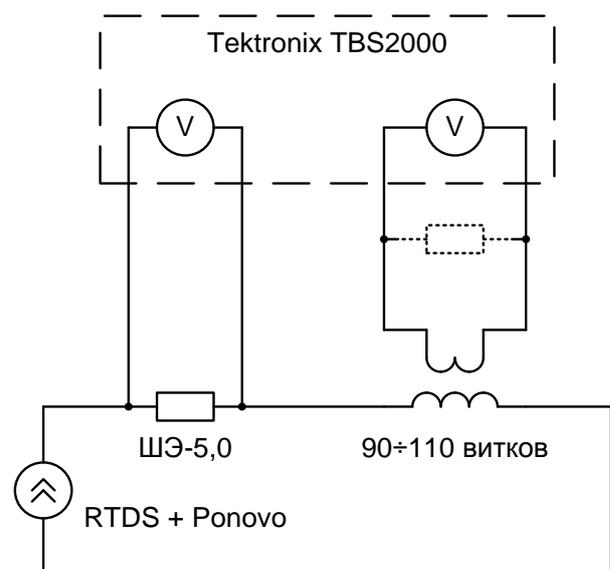


Рис. 4. Схема эксперимента

Для измерения были взяты следующие датчики: тороидальный малогабаритный ТТ, выполненный на сердечнике из аморфной стали; катушка Роговского; датчик на эффекте Холла; магнитотранзисторный датчик. При выполнении экспериментов были выбраны следующие частоты: от 1 до 9 герц с шагом 1 герц; от 10 до 90 герц с шагом 10 герц; от 100 до 900 герц с шагом 100 герц; от 1 до 9 кГц с шагом 1 кГц и от 10 до 50 кГц с шагом 5–10 кГц. Номинальные коэффициенты преобразования датчиков откалиброваны таким образом, чтобы на частоте 50 Гц значения с датчиков совпадали со значением тока, следовательно, АЧХ имело единичное значение. Поскольку амплитуда сигнала является неизменной, определение ФЧХ и АЧХ не представляет особого труда и производится по следующим выражениям:

$$A(f) = \frac{i_d(f)}{i_{ид}(f)} = \frac{k_d u_d(f)}{k_{ид} u_{ид}(f)};$$

$$\varphi_d(f) = \arccos\left(\frac{k_d u_d(f)}{I(f)}\right);$$

$$\varphi_{ид}(f) = \arccos\left(\frac{k_{ид} u_{ид}(f)}{I(f)}\right);$$

$$\varphi(f) = \varphi_d(f) - \varphi_{ид}(f),$$

где $A(f)$ – АЧХ; $i_d(f)$ – вторичный ток датчика; $i_{ид}(f)$ – вторичный ток идеального преобразователя; $k_d(f)$ – калибровочный коэффициент датчика; $k_{ид}(f)$ – калибровочный коэффициент идеального преобразователя; $u_d(f)$ – вторичное напряжение на датчике; $u_{ид}(f)$ – вторичное напряжение на идеальном преобразователе; $\varphi_d(f)$ – фаза датчика; $\varphi_{ид}(f)$ – фаза идеального преобразователя; $I(f)$ – амплитуда тока с усилителя; $\varphi(f)$ – ФЧХ.

Учитывая падение выходного сигнала, выдаваемого усилителем PAV5000,

которое наиболее выражено в диапазоне частот выше 5 кГц, погрешности при малых уровнях входных сигналов могут быть значительными, поэтому для проведения опыта были исследованы шумовые характеристики измерительного прибора – осциллографа. Измерения проводились для неподключенного к датчикам щупа осциллографа в различных временных диапазонах, а полученные результаты путем наложения были сведены на один график. Анализ полученных результатов измерения шумов (рис. 5) показывает, что уровень шумов в среднем не превышает 1,5 мВ и представляет собой квантованные значения нескольких начальных разрядов встроенного в осциллограф АЦП. В дальнейшем эти данные потребуются для оценки погрешности полученных данных.

Результаты измерений АЧХ и ФЧХ датчиков представлены на рис. 6. На представленных кривых зафиксированы предельные отклонения сигнала, которые могут быть вызваны недостаточной точностью измерений, наличием шумовой компоненты, представленной на рис. 5.

Анализируя полученные графики (рис. 6), можно сделать следующий вывод: ТТ является датчиком с линейной АЧХ и ФЧХ в диапазоне 5–50000 Гц. Таким образом, схему замещения трансформатора, изначально представленную на рис. 2, благодаря отсутствию заметного влияния паразитных емкостей и индуктивностей можно представить схемой, изображенной на рис. 7. Также при малых токах промышленной частоты в условиях отсутствия эффекта насыщения погрешность измерения трансформатора тока не превышает 0,1 %, поэтому трансформатор может рассматриваться как идеальный трансформатор, т.е. без ветви намагничивания L_m .

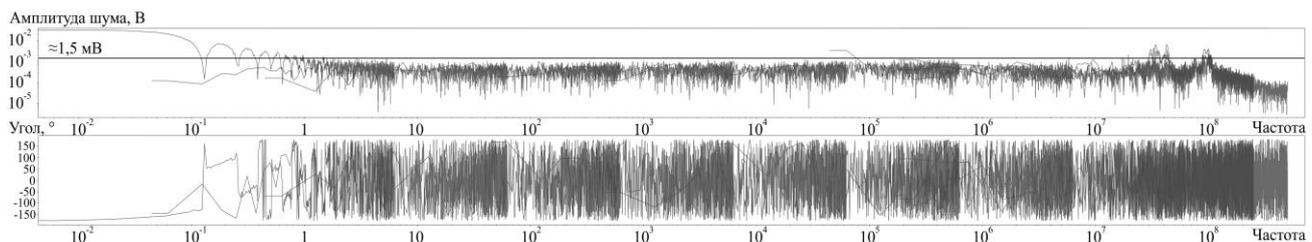


Рис. 5. Шумовая характеристика осциллографа

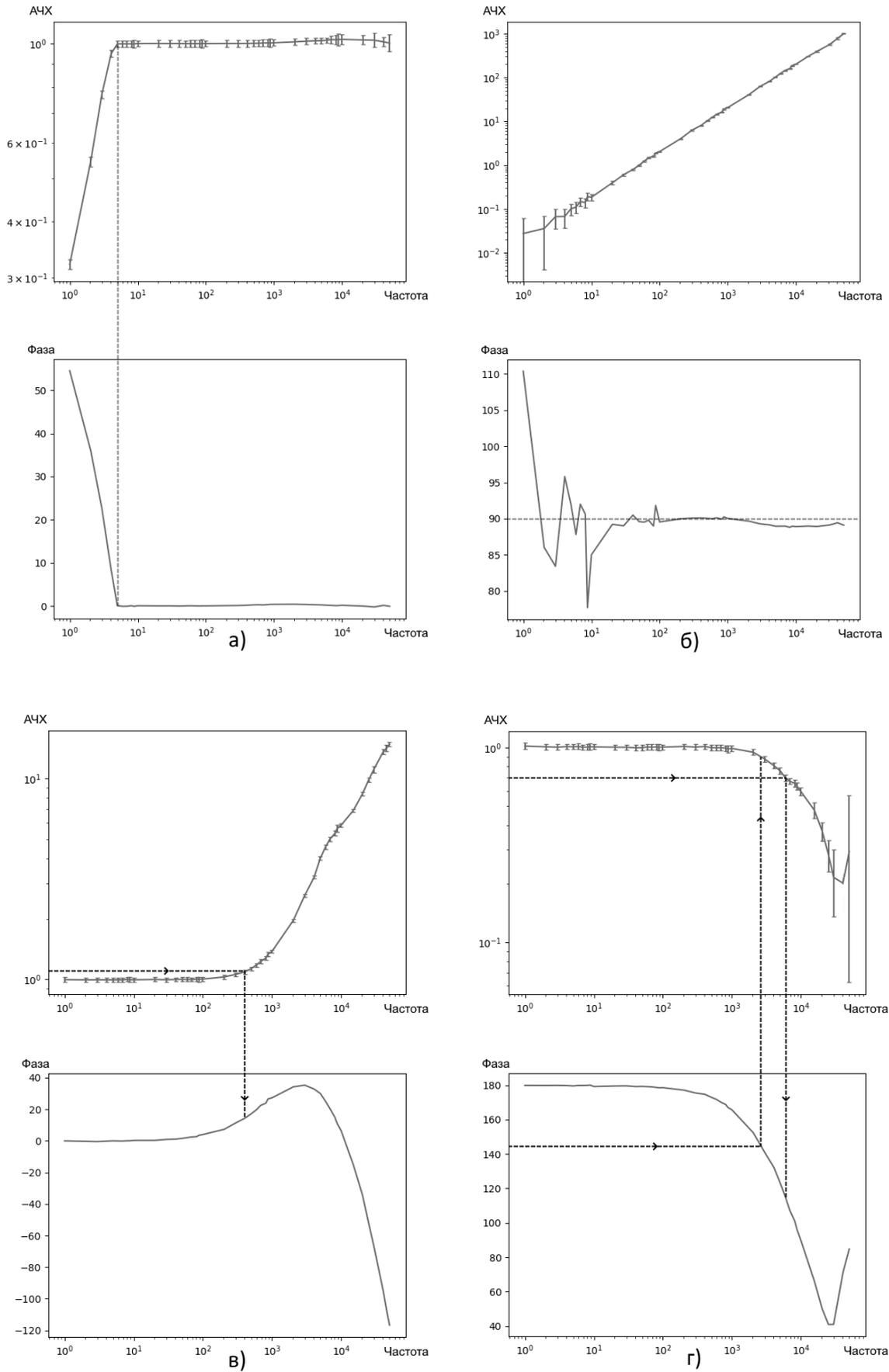


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ ТТ (а), КР (б), МТ (в) и ДХ (г)

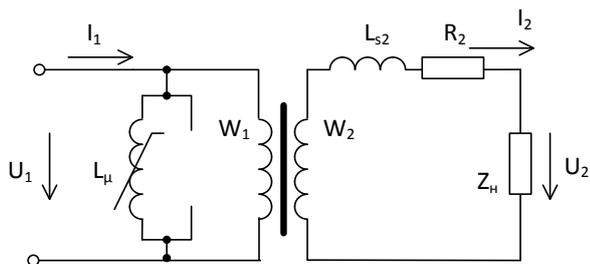


Рис. 7. Схема замещения электромагнитного трансформатора ЦТТ в частотном диапазоне от 5 до 50000 Гц.

АЧХ и ФЧХ КР демонстрируют линейный характер, но графики сильно зашумлены на низкой частоте по причине низкого выходного сигнала, сопоставимого с величиной шумовой компоненты измеряющего осциллографа. Измеренные на пониженных частотах осциллограммы имели четко выраженные ступени квантования в сигнале КР, а измерения собственных шумов осциллографа и шумов КР без подачи тока имеют такие же характерные ступени. Анализ схемы замещения КР (см. рис. 3) и результатов измерений, показанных на графиках (рис. 6,б) позволяет сделать вывод о том, что флуктуации, зафиксированные в области низких частот, не что иное, как цифровой шум осциллографа, или внешние наведенные сигналы, сопоставимые с уровнем шума. Наличие этих шумов и погрешности шкалы измерения (половина цены деления) учтено в столбчатых диаграммах ошибок на графике, поскольку избавиться от этих шумов не представляется возможным. Начиная с частоты 50 Гц, измеренные с помощью КР данные (рис. 6,б) демонстрируют линейный характер зависимости как по АЧХ, так и по ФЧХ. В области высоких частот отсутствуют нелинейности на частотных графиках, следовательно, на частотах до 50 кГц емкостные явления не вносят видимых искажений. На основании полученных данных схема замещения, представленная на рис. 3, может быть изменена и катушку Роговского можно представить схемой замещения с сосредоточенными параметрами для диапазона частот от 0 до 50000 Гц (рис. 8).

В случае, если КР нагружена на достаточно большое сопротивление (примерно > 10 кГц по опытным данным для конкретной КР), собственные сопротивление и индуктивность КР не будут вносить значительного влияния на измерения, следова-

тельно, при таких допущениях, КР можно представить как источник ЭДС.

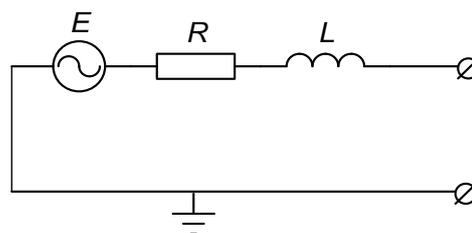


Рис. 8. Упрощенная схема замещения катушки Роговского

Особый интерес представляет АЧХ магнитотранзистора. В структуре МТ датчика находятся сами магнитотранзисторы и усилительные каскады на операционных усилителях. Также следует отметить, что в усилительном каскаде отсутствуют интегрирующие и дифференцирующие цепочки. Анализ теоретических и экспериментальных данных по работе усилительных каскадов говорит о снижении амплитуды сигнала с ростом повышения частоты. Данный эффект приводит к необходимости моделирования их характеристик запаздывающими звеньями первого или второго порядков [11]. МТ имеет АЧХ, похожую на инверсную АЧХ фильтра нижних частот (ФНЧ), усиливая ВЧ-сигналы в зависимости от их частоты и пропускающая НЧ-сигналы неизменными. ФЧХ МТ имеет характеристику с перегибом, когда угол сначала опережает измеряемый ток, а затем начинает отставать. Уникальные свойства поведения АЧХ и ФЧХ продиктованы поведением носителей заряда в полупроводниковой структуре магнитотранзистора в рассматриваемом частотном диапазоне, в частности структура МТ содержит несколько областей пространственного заряда с емкостными свойствами и эффектами, влияющими на время жизни неосновных носителей заряда.

В целях коррекции частотных характеристик, логичным решением будет применить ФНЧ, поскольку в таком случае получим линейную АЧХ и сглаженную ФЧХ. Для МТ можно определить величину, схожую по смыслу с частотой среза у фильтров, но обратную ей – частоту, при которой амплитуда вырастает в $\sqrt{2}$ раз. Согласно рис. 6,в, эта частота составляет примерно 400 Гц.

АЧХ и ФЧХ ДХ очень схожи с соответствующими АЧХ и ФЧХ у ФНЧ, за исключением того факта, что у них не совпадают частоты среза, вычисленные по соответствующим выражениям. По условию уменьшения амплитуды в $\sqrt{2}$ раз по АЧХ, частота среза у ДХ равна примерно 2,7 кГц, в то время как по условию уменьшения угла на 45 градусов по ФЧХ частота среза равна примерно 6 кГц.

Выбор ФНЧ для МТ. Для выбора частоты среза фильтра было проведено численное моделирование фильтра. АЧХ и ФЧХ ФНЧ можно описать следующей системой уравнений:

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_{cp}^2}}}; \quad (3)$$

$$\varphi(f) = -\arctg\left(\frac{f}{f_{cp}}\right),$$

где f – частота; f_{cp} – частота среза.

Умножив соответствующие значения АЧХ датчика и АЧХ фильтра, можно получить предполагаемую АЧХ датчика с фильтром. При подстановке ранее рассчитанной частоты 400 Гц в уравнение фильтра, итоговые АЧХ и ФЧХ имеют большой уклон в сторону АЧХ ФНЧ. Для выравнивания характеристик необходима частота среза выше расчетной. Итеративным путем была выбрана частота 2 кГц. Полученные АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 9.

При данной настройке фильтра АЧХ имеет линейность с погрешностью $\pm 10\%$ до частот примерно 11–12 кГц, а ФЧХ достигает -45 градусов на частотах 5–6 кГц. По полученным на модели данным был собран аналоговый фильтр на RC-цепочке. Полученные АЧХ и ФЧХ изображены на рис. 10. Их анализ показывает, что аналоговый фильтр попадает в диапазон 10 %-ной погрешности АЧХ до частоты примерно 9 кГц, в то время как фаза пересекает границу в -45 градусов на частоте 5 кГц. Данная настройка фильтров позволяет получить удовлетворительные значения АЧХ ценой ухудшения ФЧХ по сравнению с исходными (рис. 6, в). Следовательно, магнитотранзисторный датчик с фильтром может найти применение для измерений частот вплоть до 2 кГц (до 40-й гармоники в сетях 50 Гц).

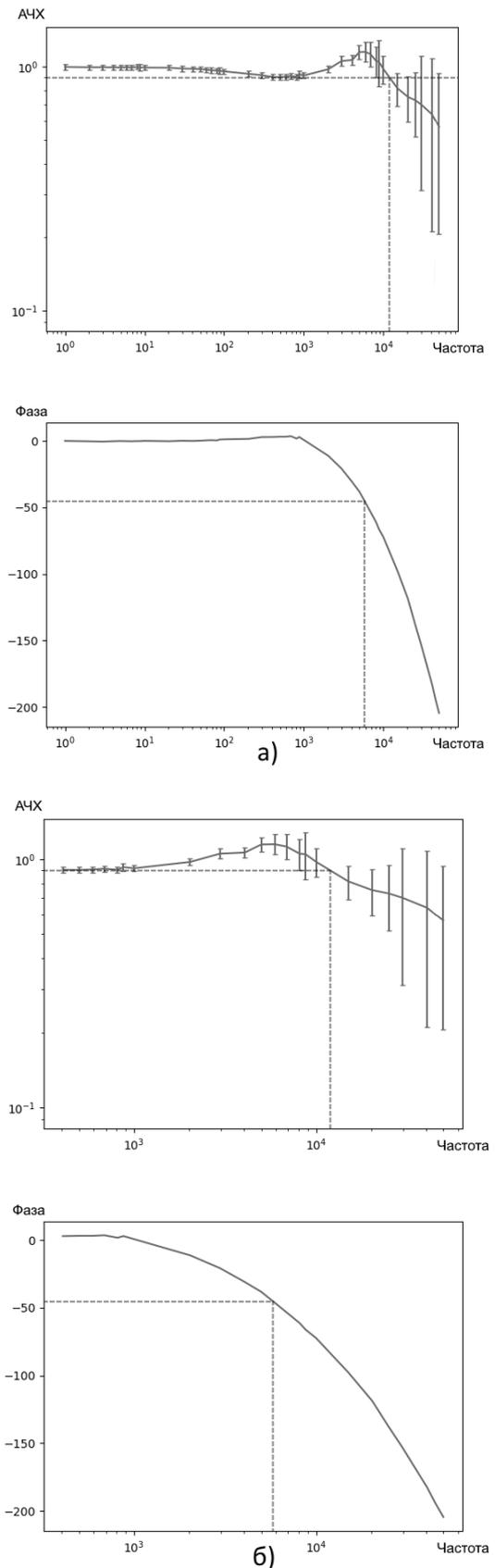


Рис. 9. АЧХ и ФЧХ МТ с цифровым ФНЧ по всему измеряемому диапазону (а) и в диапазоне 400–50000 Гц (б)

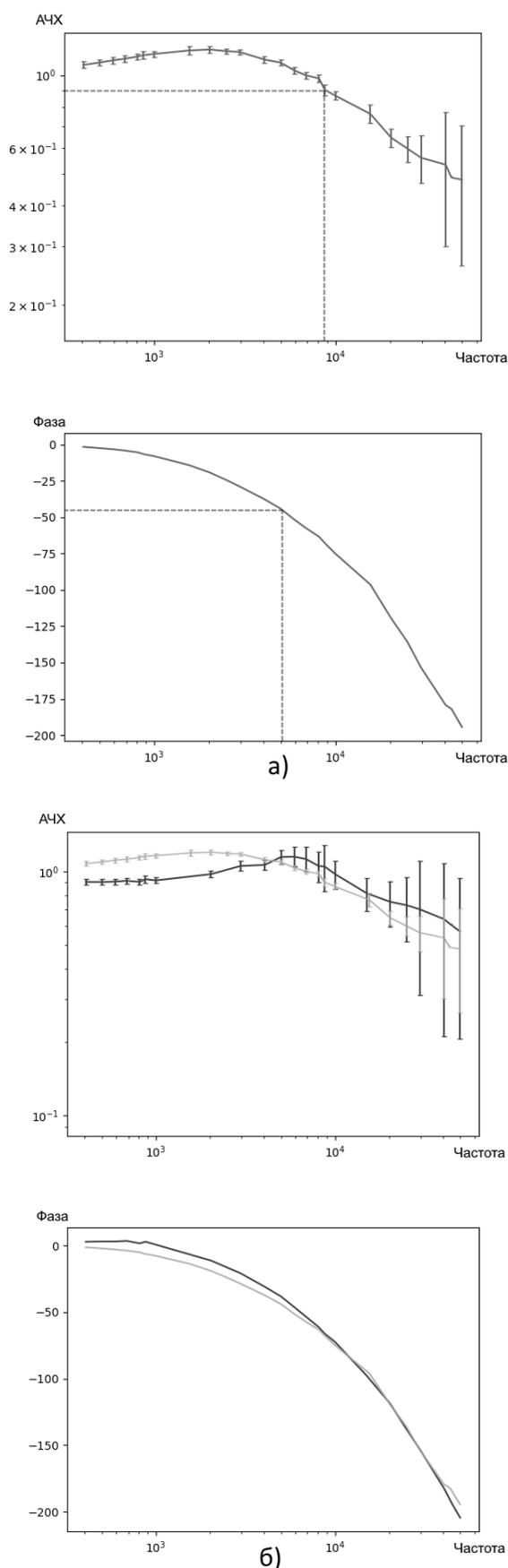


Рис. 10. АЧХ и ФЧХ МТ с аналоговым ФНЧ в диапазоне 400–50000 Гц (а) и сравнение аналогового (светлый график) и цифрового (темный график) фильтров (б)

Выводы. Несмотря на исключительную линейность ТТ в заданном диапазоне частот, разумным выбором будут являться КР и МТ-датчик, поскольку они имеют широкий амплитудный диапазон с отсутствием насыщения. Катушка Роговского пригодна к применению как датчик производной тока в своем первоначальном виде, в то время как магнитотранзисторный датчик пригоден к применению в качестве измерителя непосредственного значения тока только после выбора соответствующего ФНЧ.

В результате экспериментов показана возможность применения четырех датчиков тока для измерений в ЦТТ. ТТ и КР имеют линейные АЧХ и ФЧХ, поэтому могут быть применены практически во всех случаях. Линейность АЧХ и ФЧХ датчика Холла ограничена частотой 2 кГц, что ограничивает его применение для измерений гармонического состава токов в сети. АЧХ и ФЧХ МТ-датчика после фильтрации ограничены частотой 5 кГц, что позволяет измерять гармоники в приемлемом диапазоне для целей РЗА. В настоящем исследовании не рассматривалось влияние изменения тока на АЧХ, а также рассматривался всего один датчик каждого вида. Анализ этих факторов станет темой дальнейших исследований.

Список литературы

1. Draxler K., Styblikova R. Using instrument transformers in a wider frequency range // 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Hangzhou, China, 2011. – P. 1–4. DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944298.
2. Frequency response of Measurement Current Transformers / A. Cataliotti, D. Di Cara, P.A. Di Franco, et al. // 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. – Victoria, BC, Canada, 2008. – P. 1254–1258. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547234.
3. Вопросы применения цифровых трансформаторов тока на основе катушки Роговского для ЦПС / Р.С. Плакидин, Д.Н. Ульянов, Е.И. Хромцов и др. // Междунар. науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2023», г. Сочи. – URL: https://enip2.ru/Publication/rza_23_es_6.3_1_RRC_06_plakidin.pdf (дата обращения: 18.04.2024)
4. Development of the test platform for the characteristics of the Rogowski coil electronic current transformer / Y. Chen, Q. Huang, S. Jing, et al. // 2016 International Conference on Smart

Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). – Chengdu, China, 2016. – P. 278–283. DOI: 10.1109/ICSGCE.2016.7876069.

5. **Investigation** on anti-interference of Rogowski coil current transformers in smart substations / J. Ji, Y. Yuan, F. Pang, Y. Zheng // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). – Beijing, China, 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245234.

6. **Гречухин В.Н.** Электронные трансформаторы тока и напряжения. Состояние, перспективы развития и внедрения на ОРУ 110–750 кВ станций и подстанций энергосистем // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 35–42.

7. **Hrabcik M., Javora R., Prokop V.** Low-power Instrument Transformers Frequency Response and Accuracy Requirements for Harmonics // Proc. of the 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019). – Madrid, Spain, 2019. DOI: 10.34890/579.

8. **Пат.** на полезную модель № 174411 U1 Российская Федерация, МПК G01R 19/00, G01R 27/08. Цифровой трансформатор тока и напряжения / В.Д. Лебедев, А.А. Яблоков, Д.А. Лебедев и др.; № 2017112539; заявл. 12.04.2017; заявитель Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное объединение «Цифровые измерительные трансформаторы»; опубл. 12.10.2017.

9. **Лебедев В.Д., Григорьев Д.Г.** Разработка и исследование подхода к обработке сигналов цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения // Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 2. – С. 32–48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048

10. **Стародубцев Ю.Н.** Теория и расчет трансформаторов малой мощности. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 320 с.

11. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники: в 3 т. Т. 1: пер. с англ. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Мир, 1993. – 413 с.

References

1. Draxler, K., Styblikova, R. Using instrument transformers in a wider frequency range. 2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference. Hangzhou, China, 2011, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IMTC.2011.5944298.

2. Cataliotti, A., Di Cara, D., Di Franco, P.A., Emanuel, A.E., Nuccio, S. Frequency response of Measurement Current Transformers. 2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Victoria, BC, Canada, 2008, pp. 1254–1258. DOI: 10.1109/IMTC.2008.4547234.

3. Plakidin, R.S., Ul'yanov, D.N., Khromtsov, E.I., Andreev, P.I., Mokeev, A.V. Voprosy primeneniya tsifrovyykh transformatorov toka

na osnove katushki Rogovskogo dlya TsPS [Issues of using digital current transformers based on Rogowski coils for digital substations]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Releynaya zashchita i avtomatika energosistem – 2023»* [International scientific and technical conference “Relay protection and automation of power systems – 2023”]. Sochi, 2023. Available at: https://enip2.ru/Publication/rza_23_es_6.3_1_RRC_06_plakidin.pdf (accessed 18.04.2024)

4. Chen, Y., Huang, Q., Jing, S., Mo, C., Zhen, W., Wu, J. Development of the test platform for the characteristics of the Rogowski coil electronic current transformer. 2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). Chengdu, China, 2016, pp. 278–283. DOI: 10.1109/ICSGCE.2016.7876069.

5. Ji, J., Yuan, Y., Pang, F., Zheng, Y. Investigation on anti-interference of Rogowski coil current transformers in smart substations. 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245234.

6. Grechukhin, V.N. Elektronnyye transformatory toka i napryazheniya. Sostoyaniye, perspektivy razvitiya i vnedreniya na ORU 110–750 kV stantsiy i podstantsiy energosistem [Electronic current and voltage transformers. Status, prospects for development and implementation at outdoor switchgear 110–750 kV stations and substations of power systems]. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 4, pp. 35–42.

7. Hrabcik, M., Javora, R., Prokop, V. Low-power Instrument Transformers Frequency Response and Accuracy Requirements for Harmonics. Proc. of the 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED 2019). Madrid, Spain, 2019. DOI: 10.34890/579.

8. Lebedev, V.D., Yablokov, A.A., Lebedev, D.A., Naumov, A.V., Mironov, S.V. *Tsifrovoy transformator toka i napryazheniya* [Digital current and voltage transformer]. Patent RF, no. 174411, 2017.

9. Lebedev, V.D., Grigor'ev, D.G. Razrabotka i issledovanie podkhoda k obrabotke signalov tsifrovyykh izmeritel'nykh transformatorov toka i napryazheniya [Development and research of an approach to signal processing of digital instrument current and voltage transformers]. *Vestnik IGEU*, 2024, issue 2, pp. 32–48. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.2.032-048.

10. Starodubtsev, Yu.N. *Teoriya i raschet transformatorov maloy moshchnosti* [Theory and calculation of small power transformers]. Moscow: IP RadioSoft, 2005. 320 p.

11. Khorovits, P., Khill, U. *Iskusstvo skhemotekhniki: v 3 t., t. 1* [The Art of Electronics: in 3 vols., vol. 1]. Moscow: Mir, 1993. 413 p.