

2. Интеллектуальные функции для мостовых кранов [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: [www.ru.konecranes.ua/intellektualnye-funkcii-dlya-mostovykh-kranov](http://www.ru.konecranes.ua/intellektualnye-funkcii-dlya-mostovykh-kranov). – Название с экрана.
3. Сидоров С.Н. Теория автоматического управления в задачах электропривода : учебное пособие / С.Н. Сидоров, Н.А. Лунина. – Ульяновск : УЛГТУ, 2013. – 122 с.
4. Савельев И.В. Курс общей физики : учебное пособие / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1970. – 508 с. – 2 т. – (Механика, колебания и волны, молекулярная физика).
5. Расчет коэффициента формы [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.physicedu.ru/phy-1592.html>. – Название с экрана.

#### References:

1. *Protivoraskachivanie gruzа* (Anti-load of cargo) Available at: [www.dvesta.com/technical-solutions/special-functions-for-cranes-in-the-composition-of-the-management/crane-antisway.html](http://www.dvesta.com/technical-solutions/special-functions-for-cranes-in-the-composition-of-the-management/crane-antisway.html) (accessed 15 April 2018) (Rus.)
2. *Intellektual'nye funktsii dlia mostovykh kranov* (Smart functions for bridge cranes) Available at: [www.ru.konecranes.ua/intellektualnye-funkcii-dlya-mostovykh-kranov](http://www.ru.konecranes.ua/intellektualnye-funkcii-dlya-mostovykh-kranov) (accessed 03 June 2018) (Rus.)
3. Sidorov S.N., Lunina N.A. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia v zadachakh elektroprivoda: ucheb. posobie* [The theory of automatic control in electric drive problems: a tutorial]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2013. 122 p. (Rus.)
4. Saveliev I.V. *Kurs obshchei fiziki. Tom 2 – Mekhanika, kolebaniia i volny, molekuliarnaia fizika* [The course of general physics. Volume 2 – Mechanics, Oscillations and Waves, Molecular Physics]. Moscow, Science Publ., 1970. 508 p. (Rus.)
5. *Raschet koeffitsienta formy* [Calculation of the form factor] Available at: [www.physicedu.ru/phy-1592.html](http://www.physicedu.ru/phy-1592.html) (accessed 30 June 2018) (Rus.)

Рецензент: А.И. Симкин  
канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 20.08.2018

УДК 621.313.5/8; 621.314.2

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160279

© Дьяченко М.Д.<sup>1</sup>, Коромысленко В.Ю.<sup>2</sup>

### ОДИН ИЗ ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЦИФРОВОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

*В статье рассмотрены предпосылки создания высоковольтных измерительных трансформаторов тока, обладающих практически абсолютной электрической прочностью и широким динамическим диапазоном, способных обеспечить требования по точности как для коммерческого учета электроэнергии, так и для аппаратуры релейной защиты, которые могут быть использованы для любых классов напряжений. Показано, что наиболее целесообразно произвести разделение цифровых потоков измерений токов уже непосредственно после интегратора катушки Роговского, а сам интегратор выполнить пассивного типа. Такое решение позволяет относительно малыми затратами обеспечить необходимые параметры преобразования сигнала, удовлетворяющие требованиям как коммерческого учета электроэнергии, так и аппаратуры релейной защиты подстанций.*

**Ключевые слова:** измерительный трансформатор тока, цифровой поток, катушка Роговского, сеть передачи данных цифровой потенциометр.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [signnet.dmd@gmail.com](mailto:signnet.dmd@gmail.com)

<sup>2</sup> студент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

*Дяченко М.Д., Коромисленко В.Ю. Один з підходів до створення високовольтного цифрового вимірювального трансформатора струму. У статті розглянуто передумови створення високовольтних вимірювальних трансформаторів струму, що мають практично абсолютну електричну міцність і широкий динамічний діапазон та здатні забезпечити вимоги по точності як для комерційного обліку електроенергії, так і для апаратури релейного захисту, вони можуть бути використані для будь-яких класів напруг. Обґрунтовано необхідність розробки малогабаритних цифрових вимірювальних трансформаторів струму для широкого діапазону вимірюваних струмів, що мають абсолютну електричну міцність і низьку ціну, що дозволило б застосовувати їх для будь-якого класу напруги та дало можливість працювати в широкому діапазоні вимірюваних струмів. Розглянуто питання апаратної реалізації такого вимірювального перетворювача. Запропоновано виконати трансформатор струму у вигляді двох незалежних блоків – вимірювального і підстанційного. Вимірювальний блок розташований безпосередньо на струмоведучому провіднику, а прийомний підстанційний блок знаходиться в безпосередній близькості від вимірювального блоку на відстані, що гарантовано забезпечує електричну міцність системи. З'єднання між блоками здійснюється за допомогою широкопasmового багатоканального радіоканалу, що працює в безліцензійному діапазоні радіочастот зі з'єднанням типу «точка-точка». У даному рішенні запропоновано для збільшення діапазону вимірюваних значень струмів використовувати інструментальні підсилювачі, які адаптуються та спільно з двоконтурною котушкою Rogovського і пасивним інтегратором можуть бути дистанційно перебудовані під вирішення широкого кола завдань вимірювання струму. Показано, що найбільш доцільно провести поділ цифрових потоків вимірювань струмів вже безпосередньо після інтегратора котушки Rogovського, а сам інтегратор виконати пасивного типу. Таке рішення дозволяє відносно малими витратами забезпечити необхідні параметри перетворення сигналу для задоволення вимогам як комерційного обліку електроенергії, так і апаратури релейного захисту підстанцій.*

**Ключові слова:** вимірювальний трансформатор струму, цифровий потік, котушка Rogovського, мережа передачі даних, цифровий потенціометр.

*M.D. Dyachenko, V.Yu. Koromyslenko. One approach to the creation of a high-voltage wide-range digital measuring current transformer. The article considers the prerequisites for the creation a high-voltage measuring current transformers with near-absolute electric strength and wide dynamic range that can provide precision requirements for both commercial metering of electricity and relay protection equipment and can be used for any voltage classes. The necessity was pointed for developing small-sized digital current transformers of wide range of measurable currents with absolute electric strength and low price, which would make it possible to use them for any voltage in a wide range of measured currents. The article reviews the hardware of such a measuring transducer. A current transformer made as two independent blocks - a measuring and a substation one has been proposed. The measuring unit is located directly on the current-carrying conductor, and the receiving substation unit is located in the immediate proximity to the measuring unit at a distance that guarantees the electrical strength of the system. The blocks are connected by wideband multi-channel radio circuit operating with a point-to-point connection in a license-free band of radio frequencies. In order to increase the range of measured current values it has been offered to use adaptable instrumental amplifiers, which, together with the double-circuit Rogowski coil and passive integrator, can be remotely rearranged to solve a wide range of current measurement tasks. The article shows that it is most expedient to separate digital streams of current measurements directly after the Rogowski coil integrator, the integrator being of the passive type. Such solution makes it possible to provide, by relatively low costs, the necessary signal transform parameters that would satisfy the requirements of both commercial electricity metering and the relay protection equipment of substations.*

**Keywords:** current measuring transformer, digital flow, Rogowski coil, data-communication network, digital potentiometer.

**Постановка проблеми.** Для работы с устройствами релейной защиты, приборами учета и контроля традиционно используются трансформаторы тока, работа которых основана на законе электромагнитной индукции. Но присущие им ряд недостатков вызвали стремление работников применять нетрадиционные способы измерения тока.

Особенности конструкций традиционных трансформаторов тока таковы, что они сами являются виновниками пожаров и системных аварий, наносящих значительный ущерб. Одна из наиболее ощутимых аварий за последнее время – авария на подмосковной подстанции «Чагино 500 кВ» 25.05.2005г., в результате которой произошли массовые отключения потребителей, а для самой подстанции потребовался капитальный восстановительный ремонт.

В РАО «ЕЭС России» в период 1995-2005 гг. был проведен анализ более 700 аварий в энергосистеме, возникших в результате повреждений трансформаторов тока напряжением 110÷750 кВ. Выявлена основная причина этих повреждений – это пробой изоляции трансформатора тока в месте прохождения высоковольтного проводника вблизи магнитопровода.

Попытки найти альтернативу традиционным трансформаторам тока ведутся более 40 лет [1, 2]. Наиболее перспективным направлением в совершенствовании высоковольтных трансформаторов тока считаются оптические трансформаторы тока [3]. Работа таких трансформаторов основывается на эффекте Фарадея. Однако они достаточно дорогие и, в связи с этим, находят применение только в сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Расширение номенклатуры цифровых устройств релейной защиты и автоматики, а также стремление к переходу на цифровые подстанции, предопределил появление множества публикаций, связанных с модернизацией классических трансформаторов тока либо об исключительном переходе на альтернативные измерительные преобразователи тока. Обусловлено это множеством недостатков измерительных трансформаторов, выпускаемых по старой технологии. А необходимость решения задач мониторинга, анализа и управления оборудованием подстанции в частности и энергосистемой в целом в цифровой форме требуют создания и современных цифровых трансформаторов тока [4, 5].

При этом основное направление исследований направлено на совершенствование оптических трансформаторов тока, построенных на эффекте Фарадея. Как известно, эффект Фарадея – это магнитооптический эффект, который проявляется как поворот вектора поляризации света под действием магнитного поля, вызываемого током, протекающим по проводникам. Причем, вращение плоскости поляризации света практически линейно зависит от интенсивности магнитного поля.

Однако в последнее время интерес вызывают не только оптические трансформаторы тока. Это объясняется тем, что наряду с рядом неоспоримых преимуществ оптических трансформаторов тока им присущи и два основных взаимосвязанных недостатка: относительно высокая стоимость и неабсолютная электрическая прочность, несмотря на уникальную электрическую прочность оптоволокна [6].

Так, появился ряд публикаций, в которых предлагается использовать несколько иной способ контроля тока, а именно – по падению напряжения на сопротивлении шунта [7]. А каналом передачи данных является радиоканал. Такое решение наиболее предпочтительно, так как позволяет добиться абсолютной электрической прочности, да и цена такого решения на несколько порядков ниже цены оптических трансформаторов тока.

**Цель статьи** – обосновать необходимость разработки малогабаритных цифровых измерительных трансформаторов тока для широкого диапазона измеряемых токов, обладающих абсолютной электрической прочностью и низкой ценой, что позволило бы применять их для любого класса напряжений, работающих в широком диапазоне измеряемых токов. Рассмотреть вопросы аппаратной реализации такого измерительного преобразователя.

**Изложение основного материала.** Классические трансформаторы тока постепенно вытесняются трансформаторами тока оптического типа. По сравнению с классическими трансформаторами тока оптические преобразователи обладают рядом неоспоримых преимуществ. Это широкий динамический диапазон преобразования, высокая термическая и электродинамическая устойчивость, превосходная линейность и отсутствие явлений насыщения, гистерезиса и резонанса. Немаловажным фактором является и отсутствие влияния нагрузки вторичных цепей на точность преобразования. А класс точности оптического измерительного комплекса вообще недостижим для классических трансформаторов тока, в особенности, если речь идет о цифро-

вом інтерфейсе.

Однако применение оптических технологий для решения широкого круга задач в разных классах напряжений пока затруднительно ввиду их относительно высокой стоимости. Понятно, что цена оптических трансформаторов тока будет неуклонно снижаться, но маловероятно, что в обозримом будущем она окажется приемлемой для широкого круга задач, особенно в сетях среднего и низкого уровней напряжений. Поэтому наблюдается и некоторая тенденция к поиску более дешевых вариантов измерения токов без применения прецизионной оптомеханики и способных обеспечить электрическую прочность для измерения тока в сетях любого класса напряжений.

Для решения проблемы гальванической развязки с подстанционным оборудованием вместо оптоволокну принято решение использовать многоканальный широкополосный радиоканал. Отказ от оптоволокну позволяет отказаться и от высоковольтных изоляторов, опор с фундаментами под них и тем самым многократно (на несколько порядков) сократить капитальные затраты.

Получить линейный датчик тока, имеющий широкий динамический диапазон, обеспечивающий необходимую точность преобразования как для аппаратуры релейной защиты, так и для коммерческого учета электроэнергии, несложно, используя падение напряжения на сопротивлении шунта. При этом необходимо обеспечить коррекцию производимых измерений, вызванных изменением температуры шунта. Однако такое решение с точки зрения эксплуатации не очень удачное, так как требует включение шунта в разрыв силовых проводников, что значительно снижает потребительские свойства таких преобразователей.

Пояс Роговского куда более предпочтителен, особенно разрезного типа, так как позволяет исключить вмешательство в высоковольтные силовые цепи. При использовании пояса Роговского может быть достигнут положительный эффект «мгновенного монтажа», когда монтаж трансформатора тока на токоведущий проводник занимает считанные минуты.

На рис. 1. приведена общая концепция предлагаемого универсального цифрового измерительного трансформатора тока. На рисунке показано, что измерительный блок 2 цифрового трансформатора тока устанавливается непосредственно на токоведущий проводник 1 без разрыва токоведущих цепей. Приемный блок 3 расположен вблизи измерительно-передающего блока на удалении, достаточном для обеспечения электрической прочности.

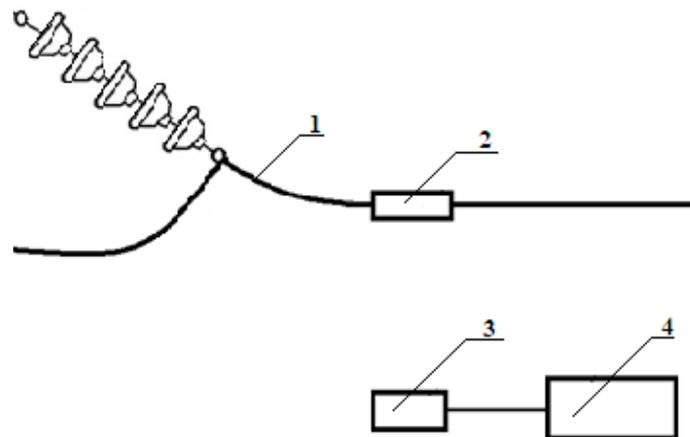


Рис. 1 – Общая концепция предлагаемого универсального цифрового трансформатора тока: 1 – токоведущий проводник; 2 – измерительный блок; 3 – приемный блок; 4 – подстанционный блок

Взаимодействие между блоками 2 и 3 осуществляется посредством широкополосного многоканального радиоканала, работающего в безлицензионном диапазоне радиочастот ISM от 900 МГц до 2,4 ГГц с соединением типа «точка-точка».

Подстанционный блок 4 обеспечивает согласование с измерительными приборами и аппаратурой релейной защиты подстанции. Такое решение полностью исключают проблемы, связанные с обеспечением необходимого уровня изоляции. Частично о таком решении было представлено в работах [8, 9].

На рисунке 2 показана блок-схема универсального цифрового трансформатора тока. В качестве измерительного элемента 2 в данном преобразователе предлагается использовать катушку Роговского двухконтурного типа.

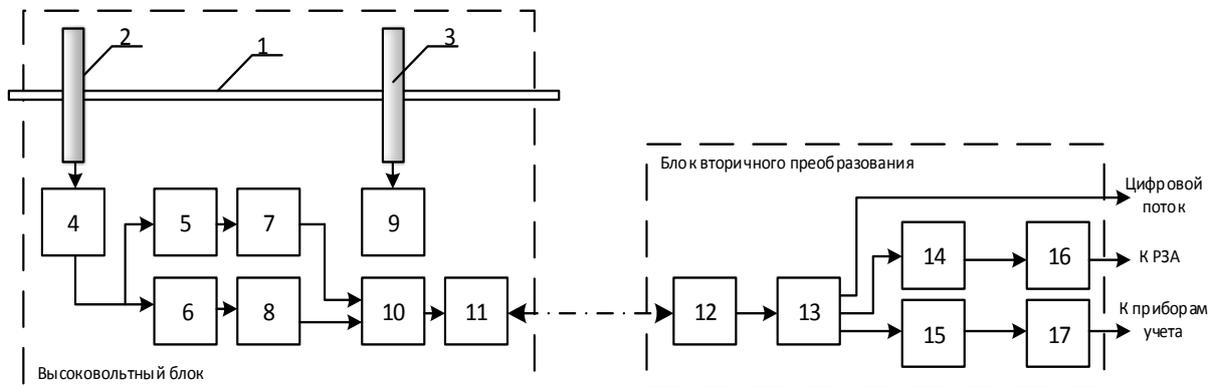


Рис. 2 – Блочная концепция универсального цифрового трансформатора тока: 1 – токоведущий проводник; 2 – двухконтурная катушка Роговского; 3 – трансформатор тока; 4 – пассивный интегратор; 5, 6 – управляемые измерительные усилители; 7, 8 – АЦП; 9 – блок питания; 10, 13 – микроконтроллеры; 11, 12 – модули широкополосного радиоканала; 14, 15 – ЦАП; 16, 17 – усилители мощности с токовым выходом

Благодаря отсутствию сердечника, катушка Роговского имеет хорошую линейность в широком диапазоне токов и лишена множества недостатков, присущих традиционным трансформаторам тока, но выходной сигнал катушки Роговского дифференцирован по времени, это вызывает необходимость применять интегратор для получения соответствующего значения первичного протекающего тока.

Как известно, между магнитным потоком  $\Phi$  и напряженностью магнитного поля  $H$  существует зависимость:

$$\Phi = \iint \mu_0 \cdot H \cdot dS = \mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \oint H \cdot dl, \quad (1)$$

где  $A$  – поперечная площадь сечения;  $n$  – число витков сечения длиной  $dl$ ;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха.

Вследствие наведенного электрического поля при изменении магнитного поля в замкнутом контуре индуцируется э.д.с.:

$$U_c = \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \cdot A \cdot n \cdot \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

Напряжение на выходе катушки Роговского пропорционально производной тока и для преобразования его в сигнал, пригодный для дальнейшей обработки, необходимо произвести его интегрирование:

$$U_{out} = -\frac{1}{\tau} \cdot \int U_c \cdot dt = -\frac{\mu_0 \cdot A \cdot n}{\tau} \cdot I, \quad (3)$$

где  $\tau$  – постоянная интегрирования.

Для интегрирования сигнала может быть применено пассивное, активное либо цифровое интегрирование [10]. Путем перестройки постоянной интегрирования  $\tau$  и взаимной индуктивности катушки  $\mu_0 \cdot A \cdot n$  можно менять выходное напряжение интегратора в широких пределах, обеспечивая тем самым широкий диапазон перекрытия измеряемых токов – от десятка до сотен тысяч ампер.

Исходя из самого принципа работы катушки Роговского, ее выходной сигнал подвержен негативному воздействию внешних магнитных полей. Только благодаря равномерности обмотки витков на тороидальный сердечник можно добиться существенного снижения влияния внешнего магнитного поля, уравновесивая его внутри катушки.

Для устранения наводок от низкочастотных внешних переменных электромагнитных полей обычно применяют разрезные экраны из металла с высокой магнитной проницаемостью. Эффективным методом подавления внешних магнитных полей можно также считать применение обратного витка в катушке. Но, в соответствии с рекомендацией [11], принято решение применить двухконтурную катушку Роговского, выполненную в виде двух печатных плат, что резко повышает технологичность производства трансформаторов тока и многократно снижает влияние внешних электромагнитных полей.

На рис. 3. приведена схема соединения двухконтурной печатной катушки Роговского. Для безразрывной установки ее на токоведущий проводник каждая секция выполнена в виде двух секторов с жёсткой фиксацией их в рабочем состоянии.

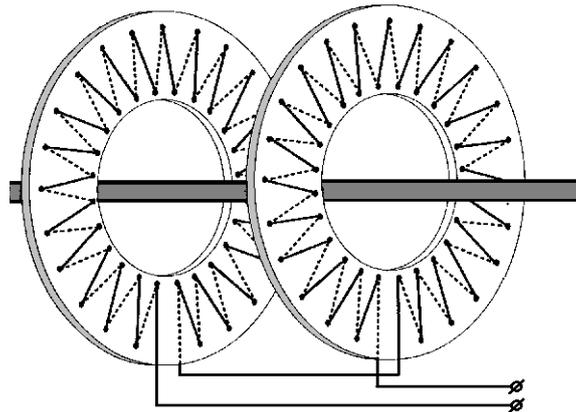


Рис. 3 – Двухконтурная печатная катушка Роговского

Дальнейшее преобразование зависит от динамического диапазона интегратора и разрядности АЦП. Применение пассивного интегратора в нашем случае позволяет охватить весь диапазон предполагаемых входных токов для всего диапазона используемых классов напряжений с дальнейшей нормализацией сигнала за счет программно адаптируемых инструментальных усилителей.

Обмотка катушки Роговского (рисунок 4) вместе с интегрирующими ёмкостями образует колебательный контур с затуханием, выходное напряжение которого имеет зависимость [10]:

$$U_{out} = \int_0^t \frac{E}{(R_{coil} + R) \cdot C} \cdot dt = \frac{L_{coil}}{(R_{coil} + R) \cdot C} \cdot \frac{I_{\tau}}{N}, \quad (4)$$

где  $N$  – число витков обмотки катушки Роговского.

Как было отмечено ранее, для минимизации затрат на аппаратное обеспечение при реализации цифрового трансформатора тока предлагается разделить канал первичного преобразования тока на два канала. Первый канал используется для измерения тока в рабочем диапазоне линии электропередачи и используется для приборов учета, второй – охватывает диапазон токов, в сотни раз превышающий диапазон рабочих токов, и предназначен для работы с аппаратурой релейной защиты. Учитывая то, что целевая функция данного трансформатора тока – широкий спектр применений, то есть способность работать в широком диапазоне первичных напряжений (от 220 В до 750 кВ), то первичный номинальный ток такого трансформатора может лежать в пределах от нескольких ампер до десятков и сотен тысяч ампер.

Но даже деление диапазона измеряемых токов на поддиапазоны не позволит охватить столь огромный динамический диапазон входных токов, даже используя АЦП сверхвысокой разрядности.

На рисунке 4 приведена упрощенная схема входного преобразователя широкодиапазонного цифрового датчика тока, на котором представлен один из вариантов решения данной проблемы.

В данном решении используются адаптируемые инструментальные усилители, которые совместно с двухконтурной катушкой Роговского и пассивным интегратором могут быть ди-

станционно перестроены под решение широкого круга задач измерения тока. На рисунке 4 представлена упрощенная схема интегратора и нормализатора входного сигнала на основе инструментальных усилителей, осуществляющих масштабирование входного сигнала. В качестве инструментальных усилителей DA2, DA4 (рис. 4) применены микросхемы INA188.

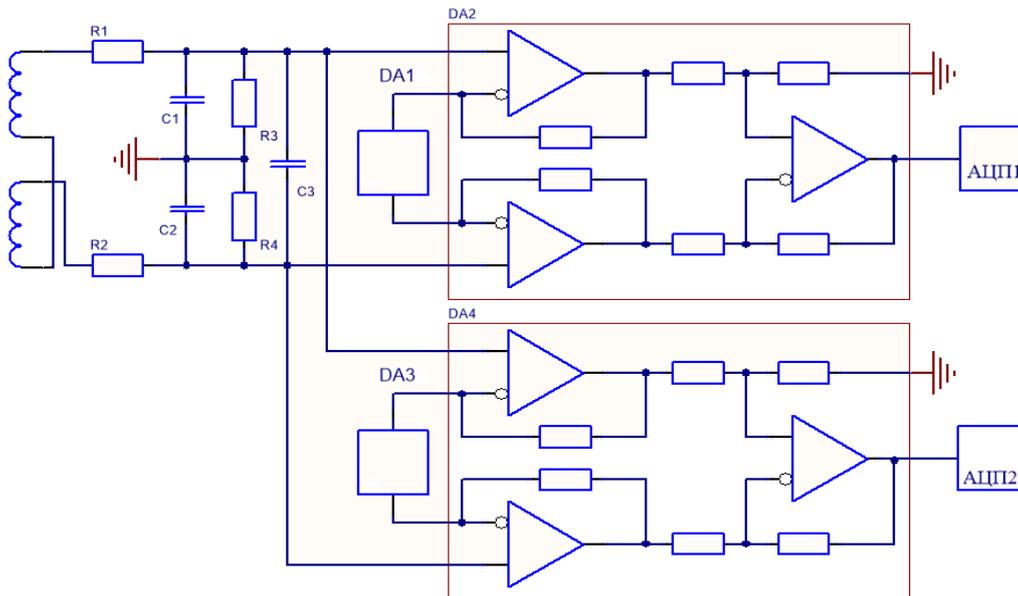


Рис. 4 – Входной преобразователь широкодиапазонного цифрового датчика тока

Микросхема INA188 является одной из последних разработок фирмы «Texas Instruments», построенной с использованием технологии «Zero-Drift», позволяющей получать чрезвычайно низкое напряжение смещения нуля (менее 55 мкВ), а также малый дрейф напряжения смещения и низкий уровень плотности шума [12].

Подстройка под заданный диапазон измерения тока (т. е. под конкретные условия работы) осуществляется цифровыми потенциометрами [13] микросхемы DA1, DA3 (рис. 4). В качестве цифрового потенциометра применена микросхема AD5271 фирмы Analog Devices, обеспечивающая 1024 градации сопротивлений при максимальной погрешности менее 1% [14]. Связь с процессором осуществляется по последовательной шине.

Выходной сигнал каждого масштабного усилителя обрабатывается своим АЦП и после соответствующего преобразования по радиоканалу передается на подстанционное оборудование. Подстанционное оборудование включает в себя модуль широкополосного радиоканала 12, микроконтроллер 13, цифро-аналоговые преобразователи 14 и 15, а также усилители мощности 16 и 17 (рис. 2).

Подстанционное оборудование (рис. 2) функционирует следующим образом. Цифровой поток, поступивший по радиоканалу, обрабатывается микроконтроллером 13 и поступает на цифро-аналоговые преобразователи 14 и 15, первый из которых совместно с усилителем мощности формирует аналоговый сигнал для подстанционных приборов учета, второй, соответственно, – для работы аппаратуры релейной защиты и автоматики.

Данное решение позволяет охватить широкий диапазон измеряемых токов, а его оригинальность защищена патентом [9].

### Выводы

В статье рассмотрены предпосылки создания высоковольтных измерительных трансформаторов тока с абсолютной электрической прочностью и широким динамическим диапазоном измеряемых токов. Широкая полоса пропускания сигналов предложенного трансформатора тока, более 10кГц, позволяет производить полный анализ не только количества потребленной электроэнергии, но и её качества. Приведены схемотехнические решения основных элементов данной конструкции. Акцентировано внимание на минимизацию капитальных затрат.

**Список использованных источников:**

1. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев [и др.]. – Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1989. – 416 с.
2. Измерительные пояса Rogovskogo для цифрового трансформатора тока / В.Д. Лебедев [и др.] // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем : научные труды IV Междунар. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. – С. 116-119.
3. Гавричев В.Д. Волоконно-оптические датчики магнитного поля : учебное пособие / В.Д. Гавричев, А.Л. Дмитриев. – СПб : СПбНИУ ИТМО, 2013. – 83 с.
4. Кровцова И.О. Обработка и передача данных для классических и цифровых электроподстанций : монография / И.О. Кровцова. – М. : Прометей, 2016. – 236 с.
5. Хренников А. Цифровые трансформаторы тока. Устройство для вычисления силы тока / А. Хренников, И. Галиев, Е. Скрудлов // Новости Электротехники. – № 6 (96). – 2015. – Режим доступа : <http://news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php>.
6. Гуревич В.И. Оптические трансформаторы тока: Нужно быть реалистами / В.И. Гуревич // Электрические сети и системы. – 2010. – № 4. – С.73-76.
7. Гречухин В.Н. Новые разработки электронных измерительных трансформаторов тока и напряжения 110-220 кВ / В.Н. Гречухин // Инновационные проекты в электросетевом комплексе: I-я Междунар. конф. – Режим доступа : [https://ruscable.ru/article/Novye\\_razrabotki\\_elektronnyh\\_izmeritelnyh/](https://ruscable.ru/article/Novye_razrabotki_elektronnyh_izmeritelnyh/).
8. Дьяченко М.Д. Цифровая защита (аппаратное и алгоритмическое обеспечение) : учеб. пособие / М.Д. Дьяченко, С.К. Поднебенная. – Мариуполь : ДВНЗ «ЛГТУ», 2014. – 398 с.
9. Пат. 110009 Україна, МПК G 01 R 19/252, G 01 R 15/18, H 01 F 38/28. Високовольтний вимірювальний трансформатор струму / М.Д. Дьяченко, В.М. Дьяченко. – № а201412319; заявл. 17.11.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20. – 6 с.
10. Корнеев М. Использование катушки Rogovskogo для токовых измерений / М. Корнеев, Ю. Троицкий // Электронные компоненты. – 2015. – № 5. – С. 123-127.
11. Kojovic L. High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements / L. Kojovic. – Mode of access : <https://studyres.com/doc/8824053/02049>.
12. Texas Instruments INA188 datasheet. – 40 p. – Mode of access : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina188.pdf>.
13. Андрусевич А. Управление потенциалом. Цифровые потенциометры Maxim/Dallas / А. Андрусевич // Новости электроники. – 2006. – № 15. – С. 3-6.
14. Analog Devices AD5271 datasheet. – 24 p. – Mode of access : [http://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270\\_5271.pdf](http://analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270_5271.pdf).

**References:**

1. Afanas'ev V.V., Adon'ev N.M., Kibel' V.M., Sirota I.M., Stognij B.S. *Transformatory toka* [Current transformers]. Leningrad, Jenergoatomizdat Publ., 1989. 416 p. (Rus.)
2. Lebedev V.D. Izmeritel'nye pojasa Rogovskogo dlja cifrovogo transformatora toka. *Nauchnye trudy IV Mezhd. nauch.-tehn. konf. «Sovremennye napravlenija razvitija sistem relejnoj zashhity i avtomatiki jenergosistem»* [Measuring Rogowski coil for the digital current transformer. Scientific works of IV Int. Sci.-tech. Conf. «Modern directions of development of relay protection systems and automation of power systems»]. Yekaterinburg, 2013, pp. 116-119. (Rus.)
3. Gavrichev V. D. *Volokonno-opticheskie datchiki magnitnogo polja: uchebnoe posobie* [Measuring Rogowski coil for the digital current transformer: tutorial]. Saint Petersburg, SPbNIU ITMO Publ., 2013. 83 p. (Rus.)
4. Krovцова I.O. *Obrabotka i peredacha dannyh dlja klassicheskikh i cifrovyyh jelektropodstancij: monografija* [The data processing and transmission for classic and digital electric substations: monography]. Moscow, Prometej Publ., 2016. 236 p. (Rus.)
5. Hrennikov A., Galiev I., Skrydlov E. Cifrovye transformatory toka. Ustrojstvo dlja vychislenija sily toka [Digital current transformers. Current rate calculator]. *Novosti Elektrotehniki – Electric Engineering News*, 2015, no. 6 (96) Available at: [www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php](http://www.news.elteh.ru/arh/2015/96/06.php) (accessed 13 May 2018). (Rus.)
6. Gurevich V.I. Opticheskie transformatory toka: Nuzhno byt' realistami Jelektricheskie seti i sistemy [Optical current transformers: it is need to be realist]. *Elektricheskie seti i sistemy – Electric*

- cal networks and systems*, 2010, no. 4, pp. 73-76. (Rus.)
7. Grechuhin V.N. Novye razrabotki jelektronnyh izmeritel'nyh transformatorov toka i naprjazhenija 110-220 kV. *Doklady I Mezhd. conf. «Innovatsionnye proekty v elektrosetevom komplekse»* [New developments of instrument current and voltage transformers of 110-220 voltage range. Proceedings of 1<sup>st</sup> Int. Conf. «Innovative projects in the electric grid complex»] Available at: [www.ruscable.ru/article/Novye\\_razrabotki\\_elektronnyh\\_izmeritelnyh/](http://www.ruscable.ru/article/Novye_razrabotki_elektronnyh_izmeritelnyh/) (accessed 13 May 2018). (Rus.)
  8. D'jachenko M. D., Podnebennaja S.K. *Cifrovaja zashhita (apparatnoe i algoritmicheskoe obespechenie): ucheb. posobie* [Digital protection (hardware and knoware): tutorial]. Mariupol, SHEE «PSTU» Publ., 2014. 398 p. (Rus.)
  9. D'jachenko M.D., D'jachenko V.M. *Visokovol'tnii vimiriuval'nii transformator strumu* [High-voltage instrument current transformer]. Patent UA, no. 110009, 2015. (Ukr.)
  10. Korneev M. Ispol'zovanie katushki Rogovskogo dlja tokovyh izmerenij [Using Rogowski coil for current measuring]. *Elektronnye komponenty – Electronic components*, 2014, no. 5 pp. 123-127. (Rus.)
  11. Kojovic L. High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements Available at: [www.studyres.com/doc/8824053/02049](http://www.studyres.com/doc/8824053/02049).
  12. Texas Instruments INA188 datasheet Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina188.pdf> (accessed 01 June 2018).
  13. Andrusevich A. Upravlenie potentsialom. Tsifrovye potentsiometry Maxim/Dallas [Potential control. Maxim/Dallas digital potentiometers]. *Novosti elektroniki – Electronics News*, 2006, no. 15, pp. 3-6. (Rus.)
  14. Analog Devices AD5271 datasheet Available at: [www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270\\_5271.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5270_5271.pdf) (accessed 01 June 2018).

Рецензент: В.В. Бурлака  
канд. техн. наук, доц., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.08.2018

УДК 621.314.2

doi: 10.31498/2225-6733.37.2018.160280

© Яшаров Р.К.<sup>1</sup>, Поднебenna С.К.<sup>2</sup>

### ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ СУДОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

*Метою роботи є забезпечення електромагнітної сумісності у судових електроенергетичних мережах за рахунок зниження рівня вищих гармонік струму. Встановлено, що основними нелінійними споживачами в судових електричних мережах є перетворювачі частоти (на базі некерованого випрямляча) у складі систем регульованого асинхронного електроприводу. Запропоновано використання в судових електроенергетичних системах активних фільтрів вищих гармонік, що дозволить забезпечити електромагнітну сумісність обладнання, виключити несинусоїдальність напруги живлення електрообладнання судових систем та покращити надійність таких систем. Ефективність запропонованого підходу щодо можливості фільтрації вищих гармонік струму у точці підключення активного фільтру до судової електричної мережі доведена в результаті імітаційного моделювання.*

**Ключові слова:** *судова електрична мережа, перетворювач частоти, асинхронний двигун, нелінійні споживачі, паралельний активний фільтр, теорія миттєвої потужності, неактивні складові потужності, гістерезисне регулювання, електромагнітна сумісність.*

<sup>1</sup> студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [yasharov\\_r\\_k@ukr.net](mailto:yasharov_r_k@ukr.net)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, [podsvet@gmail.com](mailto:podsvet@gmail.com)