

УДК 621.316.722.076.12

Разработка устройства компенсации погрешностей измерительных трансформаторов напряжения

Е.С. Андреенков

Филиал ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», г. Смоленск, Российская Федерация
E-mail: root67@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В связи с повышением требований к системам измерения и учета электроэнергии возникает задача повышения точности их составных компонентов, в том числе измерительных трансформаторов напряжения. Для повышения класса точности трансформаторов напряжения используются различные способы компенсации их погрешностей. Существующие устройства позволяют компенсировать погрешности трансформаторов напряжения либо частично, либо только в ручном режиме. В связи с этим актуальной становится разработка устройства полной автоматической компенсации погрешностей трансформаторов напряжения.

Материалы и методы: Расчеты электрических цепей выполнены на основе символического метода и метода векторных диаграмм.

Результаты: Проведен анализ способов минимизации погрешностей трансформаторов напряжения. Разработан алгоритм компенсации погрешностей трансформаторов напряжения, позволяющий обеспечить их автоматическую компенсацию при изменении вторичной нагрузки трансформаторов напряжения и при любом ее характере в диапазоне, регламентированном нормативными документами. Предлагается устройство, реализующее приведенный алгоритм и позволяющее свести к минимуму погрешности трансформаторов напряжения и значительно повысить их нагрузочную способность.

Выводы: Разработанное устройство автоматической компенсации погрешностей позволяет повысить класс точности трансформаторов напряжения, что дает возможность снизить погрешность системы учета электроэнергии в распределительных сетях 6–35 кВ.

Ключевые слова: трансформатор напряжения, компенсация погрешностей, класс точности трансформаторов напряжения, метод векторных диаграмм.

Development of an error compensation device for voltage measuring transformers

E.S. Andreyenkov

Smolensk Branch of the «National Research University MPEI», Smolensk, Russian Federation
E-mail: root67@mail.ru

Abstract

Background: Higher requirements for electric power measurement and accounting systems make it urgent to increase the accuracy of their components, including voltage measuring transformers (VT). Various methods of error compensation are used to improve the VT accuracy class. The existing devices can compensate for the VT error only partially or manually, which makes it quite timely to develop a device of fully automatic VT error compensation.

Materials and methods: Calculations of electrical circuits are made on the basis of symbolic method and vector diagrams method.

Results: Methods of minimizing voltage transformer errors have been analysed. An algorithm has been developed for automatic VT error compensation in response to VT secondary load change and any load within the range regulated by normative documents. A device has been developed that implements the algorithm and minimizes voltage transformers error and increases their load capacity.

Conclusions: The developed device of automatic error compensation can improve the VT accuracy class, which will reduce the error of the electric power metering system in 6–35 kV distribution networks.

Key words: voltage transformer, error compensation, transformer accuracy class, vector diagrams method.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.4.005-010

Задача повышения точности учета электроэнергии находится в ряду самых актуальных проблем для электроэнергетики. Одной из причин недоучета электроэнергии в распределительных сетях 6–35 кВ является наличие погрешностей в средствах измерения, таких как трансформаторы тока и трансформаторы напряжения, посредством которых счетчики электроэнергии включаются в сеть высокого напряжения.

Погрешности измерения напряжения (амплитудная и угловая) трансформаторами возникают из-за падений напряжения в сопротивлениях обмоток (первичной и вторичных) от протекающих токов. Ток первичной обмотки зависит от сопротивления цепи намагничивания и от вторичной нагрузки, а ток вторичной обмотки – только от нагрузки. При отсутствии нагрузок во вторичных цепях трансформатора напряжения (ТН)

его погрешности обусловлены током намагничивания и соответствуют погрешностям холостого хода (ХХ). Для ТН с шихтованным магнитопроводом эти погрешности зависят от величины измеряемого напряжения U_1 . У ТН, изготовленных с использованием С-образных магнитопроводов из современных электротехнических сталей в диапазоне изменения напряжения от 0,05 до $1,9U_n$, погрешности холостого хода остаются практически неизменными, что подтверждено экспериментальными данными [1, 2].

При подключении нагрузки к ТН в первичной и вторичной обмотках начинает протекать нагрузочный ток, что приводит к возникновению нагрузочных погрешностей. С увеличением мощности нагрузки ТН нагрузочные погрешности увеличиваются линейно. В связи с этим мощность нагрузки ТН в классе 0,5 ограничивается уровнем до 20 % от максимальной мощности, допустимой по условиям нагрева. Предельные уровни погрешностей для классов точности ТН нормируются в ГОСТ 1983-2001.

Для уменьшения погрешностей холостого хода приходится увеличивать сечение магнитопроводов, а для снижения нагрузочных погрешностей увеличивать сечение обмоточных проводов. В результате стоимость трансформатора напряжения высокой точности при увеличении мощности нагрузки его вторичных цепей заметно возрастает. Однако с помощью предлагаемого устройства, обеспечивающего автоматическую компенсацию погрешностей в широком диапазоне изменения нагрузок, недорогой ТН высокого класса точности может быть построен без необходимости использовать большое количество активных материалов (медь, сталь). Данное устройство можно использовать и для повышения класса точности существующих конструкций ТН, что позволит повысить их класс точности и, соответственно, снизить погрешность системы учета электроэнергии в распределительных сетях 6–35 кВ.

В ходе исследования проведен анализ способов минимизации погрешностей, в рамках которого рассматривались следующие способы компенсации погрешностей ТН:

1. *Витковая коррекция, применяемая при изготовлении ТН.* Коррекцию выполняют таким образом, чтобы при холостом ходе трансформатор имел некоторую положительную погрешность, т. е. несколько увеличивают вторичное напряжение. Для этого обычно уменьшают число витков первичной обмотки. При введении такой коррекции погрешности ТН при изменении нагрузки будут иметь как положительные, так и отрицательные знаки: при малых нагрузках погрешность будет положительная, а при нагрузках, близких к номинальной, – отрицательная. При работе ТН в низких классах точности эффективность витковой коррекции снижается, что является недостатком данного метода.

2. *Емкостная компенсация погрешностей* [3]. Осуществляется внесением во вторичную

цепь конденсаторов, емкостной ток которых компенсирует реактивную составляющую тока нагрузки. Так как доля погрешностей от реактивной составляющей тока невелика и зависит от величины индуктивного сопротивления обмоток X_T , которое значительно ниже активного ($R:X = 3:1$ для современных ТН 6–35 кВ), этот метод мало эффективен. Кроме того, характер нагрузки ТН изменился с индуктивного на емкостный в связи с заменой индукционных счетчиков на электронные, имеющие в цепи питания емкостные делители. Соответственно, применение конденсаторов для компенсации такой нагрузки оказывается невозможным.

3. *Применение вольтодобавочных устройств* [4], *увеличивающих вторичное напряжение ТН на величину погрешностей.* Известные прототипы таких устройств имеют ручное управление и эффективно компенсируют только амплитудную погрешность. Комплексные устройства, позволяющие компенсировать и угловую погрешность, значительно усложняются и требуют проведения больших объемов измерений и расчетов в рабочих условиях эксплуатации ТН. В связи с этим такие устройства не получили распространения.

В зарубежной практике [5–7] получили распространение схемы, предусматривающие включение электронных блоков компенсации в разрыв цепей первичной и вторичной обмоток ТН. Такое решение снижает надежность ТН, а также ограничивает величину токов нагрузки пропускной способностью электронных блоков.

Нами предлагается оригинальный вариант системы компенсации погрешностей ТН, в которой падения напряжения в обмотках ТН автоматически измеряются и с помощью вольтодобавочного трансформатора добавляются к напряжению вторичной обмотки. Так как погрешности ХХ полностью компенсируются витковой коррекцией, то дальнейшее рассмотрение вопросов компенсации было сосредоточено на компенсации нагрузочных погрешностей.

Компенсация погрешностей ТН предусматривает обеспечение условия равенства приведенного напряжения на нагрузке \dot{U}'_{2H} первичному (измеряемому) напряжению \dot{U}_1 :

$$\dot{U}'_{2H} = \dot{U}_1. \quad (1)$$

Предлагаемый способ компенсации погрешностей подразумевает, что к фактическому напряжению во вторичной цепи ТН \dot{U}_2 прибавляется напряжение, равное потерям напряжения в обмотках трансформатора $\Delta\dot{U}_H$:

$$\dot{U}'_1 = \dot{U}_{2H} = \dot{U}_2 + \Delta\dot{U}_H; \quad (2)$$

$$\Delta\dot{U}_H = \dot{I}_2 Z_T = \dot{I}_2 (R_T + jX_T), \quad (3)$$

где i_2 – ток во вторичной цепи трансформатора, А; R_T, X_T – соответственно активное и реактивное сопротивление обмоток трансформатора, приведенные ко вторичной обмотке, Ом.

Формирование добавочного напряжения предусматривается путем сравнения в операционном усилителе опорного напряжения \dot{U}_0 (равного измеряемому напряжению) и фактического напряжения на нагрузке. В качестве опорного предусматривается напряжение холостого хода дополнительной обмотки ТН \dot{U}_{3x} .

Однако при наличии нагрузки основной обмотки напряжение \dot{U}_0 на дополнительной обмотке не будет равно приведенному значению первичного напряжения \dot{U}'_1 в измеряемой сети. Исследования показали [8], что при наличии нагрузки в основной обмотке (i_2) напряжение холостого хода в дополнительной обмотке будет уменьшаться на величину падения напряжения в первичной обмотке ТН $\Delta\dot{U}_{H1}$.

Тогда опорное напряжение, равное неизвестному нам первичному напряжению \dot{U}'_1 , можно сформировать путем суммирования \dot{U}_{3x} с падением напряжения в первичной обмотке ТН от нагрузочного тока i_2 основной обмотки $\Delta\dot{U}_{H1}$:

$$\dot{U}_0 = \dot{U}'_1 = \dot{U}_{3x} + \Delta\dot{U}_{H1}, \quad (4)$$

$$\Delta\dot{U}_{H1} = i_2 Z_1 = i_2 (R_1 + jX_1), \quad (5)$$

где R_1, X_1 – активное и индуктивное сопротивление первичной обмотки, Ом.

Структурная схема, реализующая данный алгоритм, приведена на рис. 1. Напряжение, равное падению напряжения в первичной обмотке ТН $\Delta\dot{U}_{H1}$, в данной схеме реализуется вторичной цепью ТТ, включенного в основную вторичную обмотку. На входе усилителя Y_1 два сигнала \dot{U}_{3x} и $\Delta\dot{U}_{H1}$ суммируются, образуя напряжение, равное приведенному измеряемому напряжению \dot{U}'_1 . На входе усилителя Y_2 формируется разность напряжения \dot{U}'_1 и фактического напряжения на нагрузке \dot{U}_{2H} , которая и является необходимой добавкой ЭДС $\Delta\dot{U}_H$. Напряжение вольтодобавки усиливается и передается через вольтодобавочный трансформатор (ВДТ) во вторичную цепь, выполняя условие $\dot{U}'_{2H} = \dot{U}'_1$.

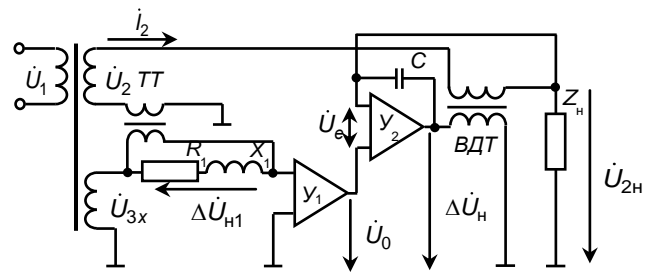


Рис. 1. Структурная схема ТН с устройством компенсации погрешностей

Рассмотрим алгоритм компенсации подробнее. Как видно из схемы рис. 1, для напряжения вольтодобавки можно записать

$$\Delta\dot{U}_H = A(\dot{U}_0 - \dot{U}_{2H}), \quad (6)$$

где A – коэффициент усиления усилителя Y_2 .

Преобразуем выражение (6) с учетом (2):

$$\Delta\dot{U}_H = A(\dot{U}_0 - (\Delta\dot{U}_H + \dot{U}_2)),$$

$$\Delta\dot{U}_H = \frac{A}{1+A}(\dot{U}_0 - \dot{U}_2). \quad (7)$$

Будем считать, что усилитель Y_2 имеет пренебрежимо малый фазовый сдвиг на частоте 50 Гц. Погрешность основной обмотки ТН можно выразить следующим образом:

$$\dot{U}_e = \dot{U}_0 - \dot{U}_{2H}. \quad (8)$$

С учетом выражений (6) и (7) можно записать:

$$\Delta\dot{U}_H = A\dot{U}_e; \quad (9)$$

$$\dot{U}_e = \frac{\Delta\dot{U}_H}{A} = \frac{\dot{U}_0 - \dot{U}_2}{1+A}. \quad (10)$$

В отсутствии усилителя погрешность измерения напряжения ТН с нагрузкой Z_H будет определяться следующим выражением:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_0 - \dot{U}_2. \quad (11)$$

Сравнивая выражения (10) и (11), можно сделать вывод, что погрешность ТН при наличии в схеме усилителя будет снижена с коэффициентом $(1+A)$ как по амплитуде, так и по углу. Этот вывод можно иллюстрировать векторной диаграммой, приведенной на рис. 2.

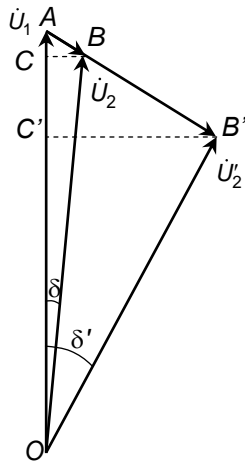


Рис. 2. Векторная диаграмма погрешностей ТН со схемой компенсации (\dot{U}_2) и без схемы компенсации (\dot{U}'_2)

На векторной диаграмме рис. 2: \dot{U}_2 – вектор вторичного напряжения ТН со схемой компенсации; \dot{U}'_2 – вектор вторичного напряжения ТН без схемы компенсации. Отрезки AC и AC' будут соответствовать амплитудным погрешностям ТН с компенсацией и без компенсации погрешностей соответственно. Углы δ и δ' будут соответствовать угловым погрешностям ТН с компенсацией и без компенсации погрешностей соответственно.

Исходя из подобия треугольников $AB'C'$ и ABC можно записать

$$\frac{AB}{AB'} = \frac{AC}{AC'} = \frac{\dot{U}_e}{\dot{U}'_e} = \frac{\dot{U}_0 - \dot{U}_2}{\dot{U}_0 - \dot{U}'_2} = \frac{1}{1+A} \quad (12)$$

Тогда амплитудная погрешность ТН с компенсацией определяется как

$$AC = AC' \frac{1}{1+A} \quad (13)$$

Обозначим относительную амплитудную погрешность ТН с компенсацией как $\Delta \dot{U}_H^* = AC/AO$ и относительную амплитудную погрешность ТН без компенсации как $\Delta \dot{U}_H^{**} = AC'/AO$, тогда с учетом (13) можно записать:

$$\frac{AC}{AO} = \frac{AC'}{AO} \frac{1}{1+A}; \quad (14)$$

$$\Delta \dot{U}_H^* = \Delta \dot{U}_H^{**} \frac{1}{1+A} \quad (15)$$

Произведем аналогичные преобразования для угловой погрешности. Так как углы δ и δ' весьма малы, с допустимой степенью точности справедливы следующие равенства:

$$\delta = \frac{BC}{OC}; \quad (16)$$

$$\delta' = \frac{B'C'}{OC'}.$$

Из подобия треугольников $AB'C'$ и ABC следует:

$$\frac{BC}{B'C'} = \frac{1}{1+A}; \quad (17)$$

$$\frac{BC}{OC} = \frac{B'C'}{OC} \frac{1}{1+A} \approx \frac{B'C'}{OC'} \frac{1}{1+A}. \quad (18)$$

С учетом (16) получим

$$\delta \approx \delta' \frac{1}{1+A} \quad (19)$$

Согласно (15) и (19), амплитудная и угловая погрешности ТН с устройством компенсации, по сравнению с погрешностями ТН без компенсации, меньше на величину коэффициента усиления $(1+A)$ раз.

Коэффициент усиления усилителя на частоте f рассчитывается как

$$A = \frac{\dot{A}_0}{A_0\beta + 1}, \quad (20)$$

где β – коэффициент обратной связи; \dot{A}_0 – комплексный коэффициент усиления усилителя с разомкнутой петлей обратной связи для схемы, состоящей из операционного усилителя (ОУ) типа 741 и выходного каскада усиления мощности:

$$\dot{A}_0 \approx \frac{10^5}{1 + j\left(\frac{f}{10}\right)} \quad (21)$$

при $\beta = 1/100$ $A = 100 \angle -17,3'$ на частоте $f = 50$ Гц.

В результате небольшого сдвига по фазе, вносимого коэффициентом усиления A , вектор погрешности с усилителем не будет совпадать с вектором AB на рис. 2. Но данный вектор повернут относительно AB на малый угол, и его влияние на амплитудную и угловую погрешности будет ничтожно.

Выходное сопротивление усилительного контура Y_2 приблизительно равно величине R_0/A , где R_0 – это выходное сопротивление каскада усиления мощности, который состоит из пары $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторов, включенных по схеме двухтактного эмиттерного повторителя. Таким образом, выходное сопротивление будет очень низким, по сравнению с сопротивлением нагрузки, а значит, усилитель Y_2 в цепи ведет себя как управляемый источник напряжения. Результирующий коэффициент усиления контура будет практически равен единице.

Конденсатор C в цепи обратной связи обеспечивает функцию интегрирующего звена для поддержания напряжения вольтодобавки на выходе ОУ.

Вольтодобавочный трансформатор является источником напряжения, эквивалентного погрешности ТН с коэффициентом трансформации, равным единице. Через него протекает нагрузочный ток, поэтому его мощность будет определяться выражением

$$S_{ВДТ} = I_2 \Delta U_H \quad (22)$$

Так как ΔU_H составляет 1–2 % от U_2 , соответственно, мощность ВДТ можно с учетом запаса принять не более 5 % от мощности компенсируемого ТН.

Приведенная на рис. 1 схема автоматической компенсации погрешностей ТН может работать и при условии, когда дополнительная обмотка также нагружена. В этом случае во вторичные цепи обеих обмоток включаются ТТ, которыми формируются падения напряжения в обмотках ТН. Сформированные напряжения суммируются с напряжением U_2 компенсируемой обмотки и формируют опорное напряжение, равное U_1' .

Согласно выше описанному алгоритму была разработана принципиальная схема устройства автоматической компенсации погрешностей ТН (рис. 3).

Отличительной особенностью предлагаемой схемы, по сравнению с зарубежными аналогами, является формирование напряжения компенсации на вольтодобавочном трансформаторе. Такое решение обеспечивает надежную работу компенсированного ТН. При выходе из строя блока компенсации компенсированный ТН продолжит работать (но уже без компенсации), так как цепь вторичной обмотки остается замкнутой через вторичную обмотку ВДТ.

Данная схема была протестирована в программном комплексе NI Multisim для различных вариантов по величине и характеру нагрузки. На рис. 4 приведены зависимости амплитудной и угловой погрешностей, снятые для ТН со схемой и без схемы компенсации для случая активной нагрузки с $\cos \varphi = 1,0$.

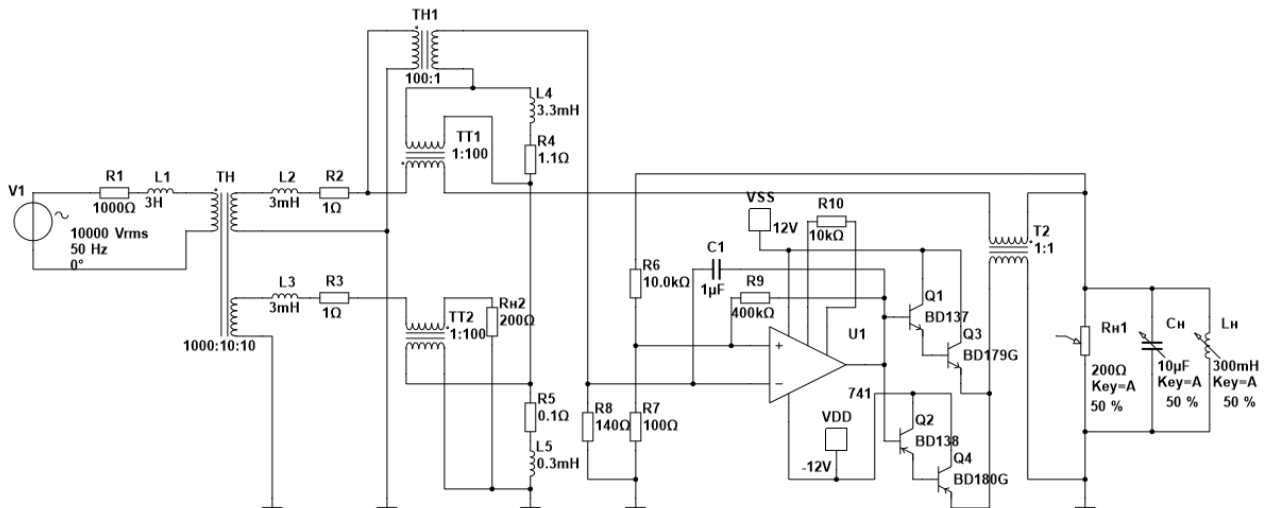


Рис. 3. Принципиальная схема устройства автоматической компенсации погрешностей ТН

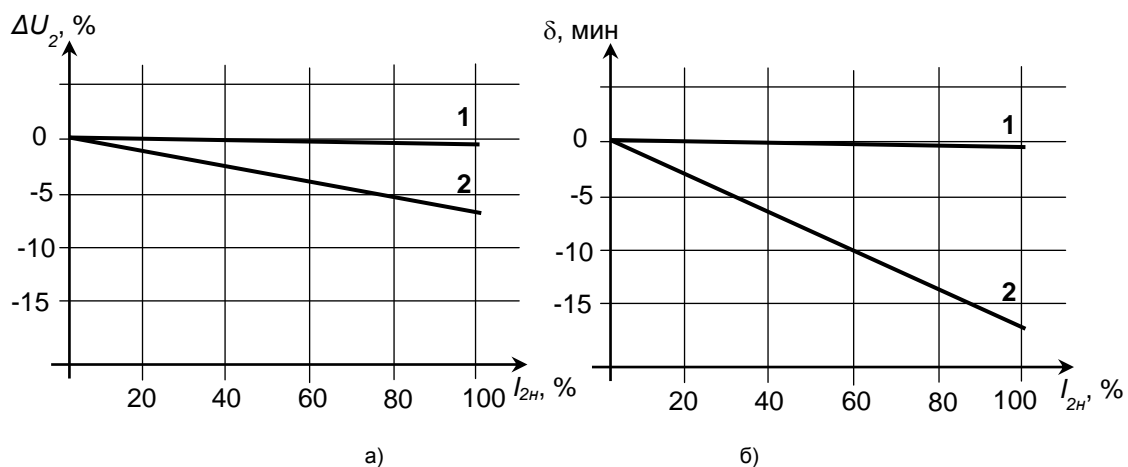


Рис. 4. Зависимость амплитудной (а) и угловой (б) погрешностей экспериментального ТН от нагрузки: 1 – для ТН с компенсацией погрешностей; 2 – для ТН без компенсации погрешностей

Для проверки работоспособности схемы были проведены физические эксперименты на базе малогабаритного трансформатора типа ТА19 220/112 В мощностью 26 Вт. Погрешности исследуемого ТН без компенсации составили 5,3 % и -12,9', при нагрузке его номинальным током с $\cos\varphi = 1,0$. Погрешности ТН при нагрузке были измерены со схемой и без схемы компенсации при различных уровнях первичного напряжения. Результаты приведены в таблице.

Результаты экспериментального исследования погрешностей ТН типа ТА19 220/112В со схемой и без схемы компенсации

Первичное напряжение, %	Амплитудная погрешность, %		Угловая погрешность (мин.)	
	Без компенсации	С компенсацией (A=1000)	Без компенсации	С компенсацией (A=1000)
60	-5,287	-0,005	-17,82	-0,02
80	-5,282	-0,005	-16,30	-0,02
100	-5,285	-0,005	-12,85	-0,01
120	-5,36	-0,005	+9,85	-0,01

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что погрешности как по амплитуде, так и по углу у ТН с компенсацией снизились примерно в 1000 раз по сравнению с ТН без компенсации, что соответствует величине коэффициента усиления А усилителя.

Таким образом, на основе схемы, описанной выше, можно построить относительно недорогой измерительный трансформатор напряжения на основе стандартного силового трансформатора для широкого диапазона нагрузок, а также повысить нагрузочную способность и класс точности существующих трансформаторов напряжения, что позволит снизить погрешность измерительного комплекса учета электроэнергии в распределительных сетях 6–35 кВ.

Список литературы

1. **Раскулов Р.Ф.** Трансформаторы напряжения 3–35 кВ. Метрологические функции первичны // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – №6(42).
2. **Раскулов Р.Ф.** Трансформаторы напряжения 3–35 кВ. Факторы, влияющие на погрешности // Новости ЭлектроТехники. – 2011. – №1(67).
3. **Малый А.С.** Емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения // Электрические станции. – 1991. – № 5. – С. 28–34.

Андреев Евгений Сергеевич,
филиал ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»» (г. Смоленск),
аспирант кафедры электроэнергетических систем,
e-mail: root67@mail.ru

4. **Артемов А.И.** Компенсация погрешностей трансформаторов напряжения 6–10 кВ с помощью вольтодобавочных трансформаторов // Труды Международного Форума по вопросам науки, техники и образования. Т. 2 / под ред. В.П. Савиных, В.В. Вишневого. – М.: Академия Наук о Земле, 2005. – С. 133–134.

5. **Slomovitz D.** Electronic compensation of Voltage Transformer // IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. – 1988. – Vol. 37. – No. 4. – P. 652–654.

6. **Slomovitz D.** Electronic Based High-Voltage Measuring Transformers // IEEE Transactions on power delivery. – 2002. – Vol. 17. – No. 2. – P. 359–361. doi: 10.1109/61.997899.

7. **Baccigalupi A., Liccardo A.** A Low Cost Device for the Compensation of Voltage Transformers // IMTC 2008 – Instrumentation and Measurement Technology Conference Vancouver Island, British Columbia, Canada, May 12–15. – 2008.

8. **Андреев Е.С.** Уточнение погрешностей трехобмоточных трансформаторов напряжения // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. тр. XII Международ. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Смоленск: Универсум, 2015. – С. 6–10.

References

1. Raskulov, R.F. Transformatory napryazheniya 3–35 kV. Metrologicheskie funktsii pervichny [3–35 kV voltage transformers. Metrological functions are of primary importance]. *Novosti ElektroTehniky*, 2006, no. 6(42).

2. Raskulov, R.F. Transformatory napryazheniya 3–35 kV. Faktory, vliyayushchie na pogreshnosti [3–35 kV voltage transformers. Factors influencing error]. *Novosti ElektroTehniky*, 2011, no. 1(67).

3. Malyy, A.S. Emkostnaya kompensatsiya pogreshnostey transformatorov napryazheniya [Capacitive compensation of voltage transformer error]. *Elektricheskie stantsii*, 1991, no. 5, pp. 28–34.

4. Artemov, A.I. Kompensatsiya pogreshnostey transformatorov napryazheniya 6–10 kV s pomoshch'yu vol'todobavochnykh transformatorov [Error compensation in 6–10 kV voltage transformers by booster transformers]. *Trudy Mezhdunarodnogo Foruma po voprosam nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Proceedings of the International Forum on science, technology and education]. Moscow, Akademiya Nauk o Zemle, 2005, vol. 2, pp. 133–134.

5. Slomovitz, D. Electronic compensation of Voltage Transformer. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 1988, vol. 37, no. 4, pp. 652–654.

6. Slomovitz, D. Electronic Based High-Voltage Measuring Transformers. *IEEE Transactions on power delivery*, 2002, vol. 17, no. 2, pp. 359–361. doi: 10.1109/61.997899.

7. Baccigalupi, A., Liccardo, A. A Low Cost Device for the Compensation of Voltage Transformers in IMTC 2008. *Instrumentation and Measurement Technology Conference Vancouver Island, British Columbia, Canada, May 12–15, 2008.*

8. Andreev, E.S. Utochnenie pogreshnostey trekhobmotochnykh transformatorov napryazheniya [Error specification in three-winding voltage transformers]. *Sbornik trudov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Informatsionnye tekhnologii, energetika i ekonomika»* [Information technologies, power engineering and economy]: proceedings of the XIIth international scientific and technical conference of students and post-graduate students]. Smolensk, Universum, 2015, pp. 6–10.