

**УДК 621.311.1**

**Артемов Александр Иванович**

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Филиал в г. Смоленск

Россия, Смоленск<sup>1</sup>

Доцент кафедры

Кандидат технических наук

E-Mail: [sfmei\\_ees@mail.ru](mailto:sfmei_ees@mail.ru)

**Сидоров Анатолий Григорьевич**

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Филиал в г. Смоленск

Старший преподаватель

E-Mail: [sfmei\\_ees@mail.ru](mailto:sfmei_ees@mail.ru)

## **К вопросу повышения точности учета электроэнергии в сетях 6-35кв**

---

<sup>1</sup> 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, дом 1

**Аннотация.** Проведен анализ погрешностей трансформаторов напряжения устанавливаемых на трансформаторных подстанциях распределительной электрической сети электроэнергетических систем.

Анализ погрешностей показал, что основную долю погрешности составляет погрешность, обусловленная токовой нагрузкой трансформатора напряжения, что приводит к значительному недоучету потребляемой электрической энергии потребителями. Для компенсации токовой погрешности серийно выпускаемых трансформаторов напряжения предложено несложное, недорогое в практической реализации устройство на основе вольтодобавочного автотрансформатора. Из-за простоты конструкции данное вольтодобавочное устройство обладает высокой надежностью, что несомненно является преимуществом, по сравнению с другими устройствами решающими подобную задачу. Например, устройствами, содержащими электронные полупроводниковые компоненты.

Предложена методика позволяющая рассчитать необходимую величину вольтодобавки в зависимости от конкретной нагрузки трансформатора напряжения. В основу методики положены паспортные данные о погрешностях приводимые предприятием изготовителем трансформаторов напряжения.

Применение предложенной вольтодобавки позволяет увеличить токовую нагрузку серийно выпускаемых трансформаторов напряжения, что раньше не представлялось возможным из-за недопустимой погрешности при использовании трансформаторов напряжения для учета потребляемой электрической энергии. Увеличение токовой нагрузки трансформаторов напряжения при эксплуатации может привести к уменьшению числа трансформаторов напряжения устанавливаемых на подстанциях, что может привести к существенной экономии средств затрачиваемых как на сами трансформаторы, так и на ячейки распределительных устройств в которых они установлены.

Ориентировочные расчеты показывают, что применение вольтодобавочного устройства на трансформаторе напряжения, который установлен на подстанции с силовым трансформатором мощностью 40 МВА приводит к дополнительному учету потребляемой за год электроэнергии на суммы около 2 млн. руб.

**Ключевые слова:** трансформатор напряжения; погрешность измерения; вольтодобавочное устройство; надежность; учет электроэнергии; токовая нагрузка.

Идентификационный номер статьи в журнале 168TVN314

Согласно стандарту [1], измерительные трансформаторы напряжения (ТН) предназначены для того, чтобы передавать сигнал измерительной информации приборам измерения, защиты, автоматики, сигнализации и управления.

Измерительные трансформаторы напряжения в сетях 6-35 кВ выполняют две основные задачи:

- передают сигнал устройствам релейной защиты о возникновении аварийных режимов, в частности в устройстве контроля изоляции в сети и защиты и сигнализации от замыканий на землю в линиях и электроустановках систем электроснабжения;
- передают значения измерительных напряжений в системы технического и коммерческого учета электроэнергии.

Для решения этих задач чаще всего используется один трансформатор напряжения, первичная обмотка которого должна иметь связь с землей и дополнительную вторичную обмотку для контроля изоляции. Такая схема включения трансформатора напряжения при однофазных замыканиях на землю в сети и в электроустановках приводит к увеличению напряжения на поврежденных фазах до линейного напряжения, поэтому, согласно [1] трансформаторы напряжения могут нормально функционировать при повышенном напряжении с учетом его повышения по [5] на 10%, т.е. при напряжении 1,9 номинального фазного напряжения в течение 8 часов. Кроме этого, при перемежающейся дуге замыкания на землю проявляется феррорезонанс и повышенные токи в первичной обмотке трансформатора напряжения, что является основной причиной выхода их из строя, так как защита трансформатора напряжения предохранителями, устанавливаемыми в ячейках распределительных устройств, является неэффективной.

Незаземляемые трансформаторы напряжения включаются на линейные напряжения и используются только для питания цепей учета электроэнергии преобразователей мощности и измерительных устройств. Однако в эксплуатации имеются различные схемы подключения однофазных групп измерительных трансформаторов напряжения, что приводит к различным погрешностям измерения напряжения и к снижению точности учета электроэнергии.

Нормативным документом [1] рекомендуются следующие схемы подключения трансформатора напряжения – это два однофазных трансформатора напряжения, включенные в неполный треугольник и схемы с тремя однофазными трансформаторами, соединенными в звезду и имеющие связь с землей.

Для учета электроэнергии подходит и первый вариант. обеспечивающий точный учет в симметричной уравновешенной системе при этом трансформатор напряжения не подвержен резонансным явлениям, и обеспечивает высокую надежность системы учета.

Схемы по второму варианту обеспечивают высокую точность учета в несимметричном режиме, но из-за связи с землей подвержены резонансным явлениям.

В работе [2] рассматривались погрешности измерения электроэнергии в различных схемных сочетаниях измерительных трансформаторов напряжения и измерительных трансформаторов тока и счетчиков электрической энергии:

1. Два однофазных незаземляемых трансформатора напряжения (неполный треугольник) и два трансформатора тока.
2. Два незаземляемых трансформатора напряжения и три трансформатора тока.

3. Три однофазных трансформатора напряжения включенных по схеме звезда с заземленной нейтралью и два трансформатора тока.

Погрешности определялись с подключением трехфазного как двухэлементного счетчика, так и трехфазного трехэлементного счетчика. Показано, что схема 1 (схема Арона) имеет наибольшие погрешности измерения электроэнергии в сети с изолированной нейтралью при несимметричной сети и неравномерной нагрузке. И по результатам исследований [2] для сетей 6-35 кВ рекомендовано применять схему выключения измерительных трансформаторов напряжения №3 и трехэлементный счетчик.

Поэтому для коммерческого учета электроэнергии следует рекомендовать схему трех незаземленных ТН, трех ТТ и трехэлементного счетчика электроэнергии. Обмотки ТН соединяются по схеме треугольника, что дает следующие преимущества:

- треугольник напряжений вторичной стороны соответствует треугольнику напряжений сети;
- несимметрия напряжений не сказывается на точности учета и при однофазном замыкании в сети, а трансформатор напряжения работает в нормированных диапазонах напряжений его обмоток поэтому повышается надежность трансформатора напряжения и учета электроэнергии.

В [3] для коммерческого учета электроэнергии рекомендуется использовать отдельный трансформатор напряжения и не включать в его цепи нагрузок, не относящихся к учету электроэнергии.

Погрешности измерительного трансформатора напряжения обусловлены падениями напряжения в первичной обмотке при протекании токов намагничивания (при холостом ходе трансформатора) и тока нагрузки вторичной цепи от которого зависят потери напряжения, как в первичной, так и во вторичной обмотке (нагрузочные потери напряжения) [6].

Погрешности холостого хода зависят от мощности намагничивания и от первичного напряжения. Мощность намагничивания у трансформаторов напряжения с витым С-образным магнитопроводом пропорциональна квадрату напряжения [6], поэтому относительная погрешность по напряжению при холостом ходе практически не меняется при изменении подведенного напряжения, что подтверждено [3] результатами испытаний в испытательном центре ОАО Свердловского завода трансформаторов тока (г. Екатеринбург). В диапазоне изменения напряжения от 5 до 190% номинального амплитудная погрешность изменяется всего на 0,05 %, что дает основание считать, что погрешность современных трансформаторов напряжения в диапазоне изменений первичного напряжения установленные ГОСТ на трансформаторы [1] (от 0,8 до 1,2 $U_N$ ) остаются постоянными. Изменение угловой погрешности не зависит от первичного напряжения и определяется соотношением активной и реактивной составляющей мощности намагничивания и холостого хода.

Погрешность холостого хода трансформатора напряжения обычно компенсируется витковой коррекцией и переводится из отрицательной области в положительную в пределах допустимой нормируемой по ГОСТ 1989 [5].

При подключении нагрузки во вторичную обмотку трансформатора напряжения появляется погрешности в трансформаторе, которые пропорциональны току вторичной обмотки и полному сопротивлению трансформатора  $Z_T = R_T + jX_T$ , которое складывается из активных и реактивных сопротивлений первичной и вторичной обмоток.

В общем виде погрешности трансформаторов напряжения определяются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}\delta_u \% &= -\beta U_K \cdot \cos \gamma, \\ \delta_\theta &= 34.4 U_K \cdot \sin \gamma,\end{aligned}$$

где  $U_K\%$  – напряжение короткого замыкания трансформатора напряжения;

$\beta = I_2 / I_{2H}$  – степень загрузки трансформатора напряжения по отношению к номинальной;

$\gamma$  – угол сдвига вектора  $U_H$  относительно вектора вторичного напряжения  $U_2$  трансформатора напряжения, который определяется из следующего уравнения

$$\gamma = \varphi_2 - \varphi_z,$$

где  $\varphi_2$  – угол сдвига тока нагрузки от напряжения  $U_2$ ;  $\varphi_z$  – фазный сдвиг сопротивлений трансформатора.

Как видно из этих выражений погрешность трансформатора напряжений не зависит от напряжения и изменяется линейно при изменении нагрузки вторичной цепи и от  $\cos\varphi_2$  нагрузки. При активно-индуктивном характере нагрузки трансформатора напряжения погрешность по напряжению имеет отрицательное значение, а угловая погрешность – положительное.

При наличии паспортных данных  $U_K\%$ ,  $Z_T$  или  $\varphi_z$  легко определить реальные погрешности трансформатора напряжения, измерив ток вторичной цепи трансформатора напряжения и угол  $\varphi_2$ .

В этих условиях обе погрешности трансформаторов напряжения приводят к недоучету электроэнергии, так как погрешность по напряжению снижает напряжение на счетчиках, а угловая погрешность увеличивает угол между подводимыми к счетчику током и напряжением. Так, если трансформатор напряжения работает на предельных для класса точности 1,0 погрешностях ( $\delta_u \% = 1,0\%$ ;  $\delta_\theta = 40$  минут), то недоучет при  $\cos\varphi_2=0,9$  составит 1,56%, а при  $\cos\varphi_2=0,8$  достигает 1,87%. Из этого ясно, что при компенсации погрешностей трансформатора напряжения можно повысить точность учета электроэнергии, при этом есть смысл заниматься компенсацией погрешностей трансформатора напряжения, даже если он работает в требуемом классе точности.

В [7,8,9] предлагается способ компенсации погрешностей трансформатора напряжения с помощью специально подобранных конденсаторов, компенсирующих и несимметрию нагрузки вторичной цепи трансформатора напряжения и реактивную составляющую этой нагрузки. В [8] было показано, как определить оптимальный угол между током и напряжением вторичной цепи трансформатора напряжения с помощью конденсаторов. Этот метод требует проведения большого числа измерений при отключенном трансформаторе напряжения и расчетов для подбора необходимых емкостей каждой фазы при каждом изменении нагрузки вторичной цепи трансформатора напряжения. Опыт их использования в ряде АО–энерго показал, что это требует большой квалификации персонала и больших затрат труда, отключения электроустановок. Релейная служба отметила негативные воздействия включенных конденсаторов на работу релейной защиты, поэтому эти установки были отключены и не применяются.

Как было показано в [4] погрешности можно компенсировать включением во вторичную цепь трансформатора напряжения вольтодобавочных трансформаторов (ВДТ).

Анализ вторичных цепей трансформаторов напряжения 6-10 кВ показал, что фаза «В» заземляется на вводе трансформатора напряжения и во вторичных цепях ячеек

распределительного устройства, поэтому установленный ВДТ в этой фазе оказывается заземленным с двух сторон, что обнуляет вольтодобавку этой фазы.

Учитывая, что электросчетчики подключаются на линейные напряжения (обязательно счетчики реактивной энергии) и ГОСТ на трансформаторы напряжения [1] устанавливает допустимую погрешность в измерении линейных напряжений, то для регулирования подводимых к счетчикам напряжений, достаточно вольтодобавку вводить в две фазы «А» и «С».

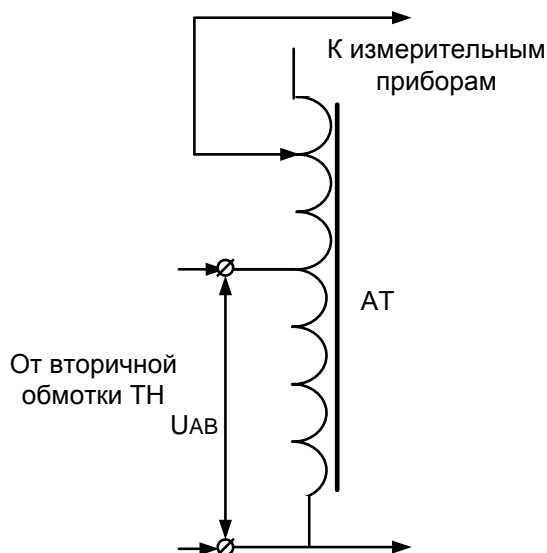
При этом изменяется напряжение  $U_{AB}$  и  $U_{BC}$ , а вольтодобавка к напряжению  $U_{CA}$  и само напряжение формируется автоматически, как векторная разность компенсированных погрешностей

$$\Delta U_{CA}^* = \Delta U_{AB}^* - \Delta U_{BC}^*,$$

вытекающая из второго закона Кирхгофа, записанного для контуров первичных и вторичных напряжений ТН.

Ранее [4] ставилась задача непрерывного автоматического формирования вольтодобавок в аналоговом и цифровом вариантах. Но практика эксплуатации и обслуживания вторичных цепей ТН показывает, что нагрузка вторичных цепей изменяется очень редко, только при подключении или отключении счетчиков при расширении или реконструкции распределительных сетей. Поэтому нагрузка ТН остается стабильной и если изменяется, то только персоналом, имеющим допуск к этим цепям. Из этого вытекает вывод, что система вольтодобавок должна формироваться ступенчато и только специализированным персоналом.

На основании изложенного нами предлагается вольтодобавочное устройство со ступенчатым изменением вольтодобавки (см. рис.1) компенсирующее только амплитудную погрешность, так как анализ фазовых погрешностей показал, что они значительны при холостом ходе ТН, но не выходят за пределы нормированных значений (для кл.0,5  $\delta_0 \leq 20'$ ).



**Рис. 1.** Вольтодобавочное устройство

При нормируемых нагрузках ТН угловая погрешность уменьшается до 7-4 минут, поэтому заниматься её компенсацией не оправдано.

Вольтодобавочное устройство на основе автотрансформатора имеет ряд преимуществ по сравнению с другими устройствами выполняющим аналогичные функции:

1. Не содержит электронных компонентов, которые снижают надежность устройства при длительном непрерывном сроке эксплуатации.
2. Мощность вольтодобавочного автотрансформатора не превышает реальную единиц ватт, что определяет низкие стоимостные показатели такого устройства не сопоставимые со стоимостью недоучтенной потребленной электроэнергии.
3. Удобство в эксплуатации – не требуется сложных расчетов необходимой вольтодобавки, несложные переключения при изменении токовой нагрузки трансформатора напряжения.
4. Возможность существенного расширения диапазона нагрузок трансформатора напряжения до максимально длительно допустимой мощности измерительного трансформатора без изменения конструкции вольтодобавочного трансформатора.
5. Возможность уменьшения необходимого количества трансформантов напряжения установленных на подстанциях и экономия ячеек распределительных устройств с измерительными трансформаторами напряжения, что также уменьшает общую стоимость распределительного устройства подстанции.

Статическую характеристику амплитудной погрешности можно получить по экспериментальным данным завода изготовителя. Так для трансформатора напряжения НАМИ-6-95УХ2 Раменского электротехнического завода она имеет вид (трансформатор напряжения с витковой коррекцией):

$$\delta_{\Pi} = 0,53 - 0,84I, \quad (1)$$

где  $\delta_{\Pi}$  – амплитудная погрешность в %;

$I$  – относительное значение тока нагрузки трансформатора напряжения в о.е.

Таким образом, измерив конкретное значение тока нагрузки трансформатора напряжения по формуле (1), можно рассчитать величину вольтодобавки и выбрать необходимую отпайку вольтодобавочного трансформатора.

#### Основные выводы:

1. Применение вольтодобавочного устройства позволяет существенно повысить точность измерения напряжения в электрической сети.
2. Расширяет диапазон нагрузочных токов трансформатора напряжения, который в реальных трансформаторах напряжения не используется из-за недопустимой амплитудной погрешности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 1983-2001 Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
2. Варакий Г.М., Танкевич Е.Н., Яковлева И.В. Особенности учета электроэнергии при несимметрии сети/ Метрология электрических измерений в электроэнергетике: Доклады третьей науч.-практ.конференции. М.:Изд-во НЦ ЭНАС 2003. Доклад 26 с.
3. Раскулов Р.Ф. Трансформаторы напряжения 3-35 кВ. Метрологические функции первичны. // Новости электротехники, №6(42), 2008. С 58-60.
4. Артемов А.И. особенности формирования погрешностей измерительных трансформаторов напряжения/ Энергетика, информатика инновации-2012. II Международная научно-техн.конф. Сб. трудов том 1, Смоленск 2012.
5. ГОСТ-Р54149 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. -М.: Стандартиформ, 2010,-27.
6. Дымнов А.М., Кибель В.Н., Тишенин Ю.В. Трансформаторы напряжения. М.: - Энергия, 1976.
7. Малый А.С. Устройство для симметрирования нагрузки трансформаторов напряжения.// Электрические станции, 1991, №4.
8. Малый А.С. Выравнивание нагрузки и емкостная компенсация погрешностей трансформаторов напряжения, включенных по схеме открытого треугольника.// Электрические станции, 1995, №9.
9. Патент №2000575. Устройство компенсации погрешностей трехфазных трехпроводных счетчиков трансформаторного включения./Малый А.С. Оpubл.бюл. 1993, №33-46.
10. [www.gamenergy.ru](http://www.gamenergy.ru). ОАО «Раменский электротехнический завод «Энергия». Продукция. Антирезонансные трансформаторы напряжения серии НАМИ.

**Рецензент:** Кавченков Валерий Петрович, доктор технических наук профессор, филиал ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, кафедра «Электроэнергетические системы».



**Artemov Aleksandr**

Smolensk branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Russia, Smolensk  
E-Mail: [sfmei\\_ees@mail.ru](mailto:sfmei_ees@mail.ru)

**Sidorov Anatolij**

Smolensk branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
Russia, Smolensk  
E-Mail: [sfmei\\_ees@mail.ru](mailto:sfmei_ees@mail.ru)

## **The question of improving accuracy of electric power accounting in the networks 6-35 kv**

**Abstract.** The inaccuracy of the voltage transformers installed at electric power distribution substations was analyzed.

This analysis shows that the main share of the inaccuracy is due to the current load of the voltage transformer, which leads to a significant underestimation of the consumed electric energy. To compensate this current inaccuracy of the commercially produced voltage transformers is offered a simple, inexpensive in the practical realization device on the basis of booster transformer. The booster device is highly reliable because of the simplicity of its construction, that certainly is an advantage in comparison with other devices solving such problems, for example, devices containing electronic semiconductor components.

The proposed method allows to calculate the required value of the voltage boost according to the load of the voltage transformer. The method is based on passport details of the inaccuracy given by the manufacturer of the voltage transformers.

The voltage boost allows to increase the current load of the voltage transformers that previously was not possible due to unacceptable inaccuracy of the voltage transformers using for accounting of consumed electric energy. The increase of the current load of the voltage transformers may lead to the decrease in the number of the voltage transformers installed at substations. This fact allows to save significant amount of money spent on the transformers themselves and switchgear cells in which they are installed.

Approximate calculations show that the use of the booster device on the voltage transformer, which is installed at the substation with power transformer 40 MVA, leads to an additional accounting of consumed electric energy for the amount of about 2 million rubles per year.

**Keywords:** voltage transformer; measurement inaccuracy; booster device; reliability; electric power accounting; current load.

Identification number of article 168TVN314

## REFERENCES

1. GOST 1983-2001 Transformatory naprjazhenija. Obshhie tehicheskie uslovija.
2. Varakij G.M., Tanksevich E.N., Jakovleva I.V. Osobennosti ucheta jelektrojenergii pri nesimmetrii seti/ Metrologija jelektricheskikh izmerenij v jelektrojenergetike: Doklady tret'ej nauch.-prakt.konferencii. M.:Izd-vo NC JeNAS 2003.Doklad 26 s.
3. Raskulov R.F. Transformatory naprjazhenija 3-35 kV. Metrologicheskie funkicii pervichny. // Novosti jelektrotehniki, №6(42), 2008. S 58-60.
4. Artemov A.I. osobennosti formirovanija pogreshnostej izmeritel'nyh transformatorov naprjazhenija/ Jenergetika, informatika innovacii-2012. II Mezhdunarodnaja nauchno-tehn.konf. Sb. trudov tom 1, Smolensk 2012.
5. GOST-R54149 Jelektricheskaja jenergija. Sovmestimost' tehicheskikh sredstv jelektromagnitnaja. Normy kachestva jelektricheskoi jenergii v sistemah jelektrosnabzhenija obshhego naznachenija. -M.: Standartinform, 2010,-27.
6. Dymnov A.M., Kibel' V.N., Tishenin Ju.V. Transformatory naprjazhenija. M.: - Jenergija, 1976.
7. Malyj A.S. Ustrojstvo dlja simmetrirovaniya nagruzki transformatorov naprjazhenija.// Jelektricheskije stancii, 1991, №4.
8. Malyj A.S. Vyravnivanie nagruzki i emkostnaja kompensacija pogreshnostej transformatorov naprjazhenija, vkljuchennyh po sheme otkrytogo treugol'nika.// Jelektricheskije stancii, 1995, №9.
9. Patent №2000575. Ustrojstvo kompensacii pogreshnostej trehfaznyh trehprovodnyh schetchikov transformatornogo vkljuchenija./Malyj A.S. Opubl.bjul. 1993, №33-46.
10. [www.ramenergy.ru](http://www.ramenergy.ru). OAO «Ramenskij jelektrotehnicheskij zavod «Jenergija». Produkcija. Antirezonansnye transformatory naprjazhenija serii NAMI.