

## Почему для измерения потерь напряжения во вторичных цепях трансформаторов напряжения (ТН) нужно использовать СА210?

### Что такое потери напряжения во вторичных цепях ТН?

Как известно [1], погрешность учета электрической энергии может быть в общем виде определена следующим образом:

$$\delta = \pm 1,1 \times \sqrt{\delta_{pI}^2 + \delta_{pU}^2 + \delta_{pl}^2 + \delta_{p\theta}^2 + \delta_{орсч}^2 + \sum_{j=1}^L \delta_{рсчj}^2} \quad (1)$$

где  $\delta_{pI}, \delta_{pU}$  – пределы допускаемых значений погрешностей соответственно ТТ и ТН по модулю входной величины (тока и напряжения) для конкретных классов точности, %;

$\delta_{pl}$  – предел допускаемых потерь напряжения во вторичных цепях ТН в соответствии с [2] ;

$\delta_{p\theta}$  – предельное значение составляющей суммарной погрешности, вызванной угловыми погрешностями ТТ и ТН, %;

$\delta_{орсч}$  – предел допускаемого значения основной погрешности счетчика электрической энергии (далее – счетчика), %;

$\delta_{рсчj}$  – предельные значения дополнительных погрешностей счетчика, %.

Измеритель потерь напряжения СА210 позволяет определять одну из составляющих погрешности учета электрической энергии -  $\delta_{pl}$ . В соответствии с [2] потери напряжения численно равны относительной разности напряжений на вторичной обмотке трансформатора напряжения (ТН)  $\dot{U}_{ТН}$  и входе счетчика электрической энергии (далее – счетчика)  $\dot{U}_{Сч}$ , в процентах:

$$\delta U_{pl} = \frac{U_{ТН} - U_{Сч}}{U_{ТН}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

В [2] также установлено:

«Для цепей напряжения потери напряжения от трансформатора напряжения при условии включения всех защит и приборов должны составлять:

до расчетных счетчиков и измерительных преобразователей мощности, используемых для ввода информации в вычислительные устройства, - не более 0,5%;

до расчетных счетчиков межсистемных линий электропередачи - не более 0,25%;

до счетчиков технического учета - не более 1,5%;

до щитовых приборов и датчиков мощности, используемых для всех видов измерений, - не более 1,5%;

до панелей защиты и автоматики - не более 3 % (см. также гл. 3.2.)»

Если исходить из принятого в метрологии правила, что пределы погрешностей образцового средства должны быть в три раза меньше погрешностей поверяемого, то пределы погрешности при измерении потерь напряжения средства измерения, используемого для контроля указанных потерь в цепях расчетных счетчиков, не должны превышать  $\pm 0,08\%$ , то есть одна треть от  $\pm 0,25\%$ .

Очевидно, что вклад потерь напряжения в погрешность учета электрической энергии соизмерим с остальными составляющими, такими как погрешность трансформаторов напряжения и тока, а также счетчика электрической энергии. Несмотря на это, до недавнего времени отсутствовали средства измерения для измерения указанной величины и, чаще всего, предлагалось определять ее расчетным путем или с помощью косвенных измерений.

Дело в том, что во многих случаях определение потерь напряжения с требуемой точностью представляет собой сложную техническую задачу. Это обусловлено, во-первых, тем, что ТН и счетчик зачастую находятся на значительном удалении друг от друга, а значения напряжения на выходе ТН непрерывно изменяются. Еще одним фактором, который оказывает значительное влияние на погрешность измерения потерь напряжения, является то, что температура воздуха, окружающего ТН, и температура воздуха, окружающего счетчик (счетчики), могут существенно отличаться.

### ***Каким образом потери напряжения измеряют на практике?***

Первые три метода относятся к косвенным измерениям потерь напряжения.

#### **Метод 1**

Потери напряжения рассчитывают по результатам измерений: импеданса линии соединения ТН со счетчиком, силы тока, протекающего через эту линию, и вторичного напряжения ТН.

$$\delta U = \frac{Z_{\text{ЛС}} \times I_{\text{ЛС}}}{U_{\text{ТН}}} \cdot 100\% = \frac{\Delta U_{\text{ЛС}}}{U_{\text{ТН}}} \cdot 100\% .$$

(3)

#### Недостатки метода:

- требуется *вывод оборудования из эксплуатации* для проведения измерения импеданса линии соединения;
- *низкая достоверность результата*, так как не учитываются сопротивления тех контактных соединений, которые рассоединяют для проведения измерений импеданса.

Достоинства метода: не требуется применение высокоточных средств измерения.

## Метод 2

Потери напряжения рассчитывают по результатам измерений падения напряжения на проводах линии соединения и вторичного напряжения ТН.

Измерить падение напряжение на проводах не трудно, если трансформатор напряжения находится на небольшом расстоянии от счетчика. Если же указанное расстояние составляет десятки, а тем более сотни метров, то указанное измерение представляет собой достаточно сложную задачу. Должны быть проложены и после проведения измерений смотаны дополнительные экранированные провода, длина которых может достигать сотни метров. Трудоемкость и неудобства при проведении измерений еще больше возрастают, если к выходу ТН подключены несколько счетчиков. К недостаткам можно отнести также необходимость одновременного ручного переключения фазных (линейных) напряжений со стороны ТН и со стороны счетчика, для чего требуется телефонная или радиосвязь.

### Недостатки метода:

*высокая трудоемкость*, связанная с прокладкой кабеля, и необходимость использования средств связи;

*трудности с обеспечением высокой точности измерения* потерь напряжения в условиях непостоянства напряжения на выходе ТН.

### Достоинства метода:

более высокая, по сравнению с предыдущим методом, точность измерения потерь напряжения.

## Метод 3

Потери напряжения рассчитывают по результатам измерений вторичного напряжения ТН и напряжения на входе счетчика.

Этот метод измерения потерь напряжения не предусматривает прокладывание дополнительных кабелей и предполагает проведение синхронных измерений напряжений на зажимах ТН и счетчика с помощью двух высокоточных вольтметров. При этом влияние систематических погрешностей вольтметров на результат измерения исключается с помощью учета их после измерения одного и того же напряжения, например, вторичного напряжения ТН. Такой метод измерения реализован в двух методиках выполнения измерений [3, 4].

Основные трудности, которые имеют место при реализации этого метода, связаны с двумя обстоятельствами: разностью температур воздуха, окружающего оба вольтметра, и нестабильностью напряжения на выходе ТН.

Во многих случаях ТН находится вне помещения при температуре, которая может быть от минус 40 °С до плюс 50 °С, а счетчик – в поме-

щении, диапазон изменения температуры в котором существенно меньше. Конечно, допустимый диапазон температур вне помещения можно ограничить более приемлемым для персонала, проводящего измерения, – от минус 10 °С до плюс 40 °С, но даже при этом разность температур воздуха окружающего оба вольтметра может составлять десятки градусов. В то же время, пределы допускаемой дополнительной погрешности, обусловленной изменением температуры (далее – дополнительная погрешность), для приборов, которые предлагается использовать в качестве вольтметров (прецизионные мультиметры, энерготестеры, энергомониторы и т.п.) при измерении потерь напряжения, составляют, в лучшем случае, от  $\pm 0,005$  до  $\pm 0,01$  % / °С.

Таблица 1

Наименование средства измерения	Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры окружающего воздуха
Мультиметр «Unigor 390»	$\pm 0,005$ % / °С
Мультиметр «Ресурс-ПЭ»	$\pm 0,007$ % / °С

Такая дополнительная погрешность делает эти приборы практически непригодными для проведения измерений указанной величины в реальных условиях применения. Покажем это на конкретном примере. Предположим, что у вольтметров дополнительная погрешность при измерении напряжения равна  $\pm 0,005$  % / °С. Как указывалось выше, пределы допускаемой абсолютной погрешности при измерении потерь напряжения не должны превышать  $\pm 0,08\%$ . Следовательно, если учесть, что знаки дополнительных погрешностей двух вольтметров могут быть противоположными, то окажется, что разность температур воздуха, на месте установки ТН и счетчика не должна превышать 8 °С! То есть, если в помещении, где установлены счетчики, 20 °С, то на месте установки ТН температура воздуха должна быть в пределах от плюс 12 °С до плюс 28 °С. Такая оценка диапазона температур является оптимистической, так как не учитывает другие составляющие погрешности измерения, например, составляющую, обусловленную непостоянством напряжения на выходе ТН. То есть, в действительности диапазон температур будет еще уже. Это обстоятельство накладывает существенные ограничения на использование указанного метода в реальных условиях применения. Следует отметить, что, как это ни удивительно, но в методиках выполнения измерений [3, 4, 5] влияние температур воздуха окружающего прибором погрешность измерений обойдено вниманием. Такую «забывчивость» авторов методик, кроме как желанием обеспечить продвижение на рынок конкретных типов средств измерений, объяснить вряд ли возможно.

Обеспечение высокой точности измерения потерь двумя вольтметрами в условиях непостоянства напряжения на выходе ТН также является сложной задачей. В некоторых случаях прибегают к синхронизации измерений напряжений вручную, используя радиосвязь. Точность такой синхронизации невелика и возможны большие погрешности измерений. Поэтому такую синхронизацию дополняют усреднением результатов в течение нескольких минут. Например, в методике выполнения измерений потерь напряжения с помощью двух «Энергомониторинг-3.3Т» [3] указанное усреднение рекомендуется выполнять в течение 15 минут!

В одной из методик [4] результаты измерений, накопленные во внутренней памяти вольтметров, в виде графиков визуально сопоставляют на экране компьютера и оператор выбирает участки, на которых производится сравнение значений напряжений. Очевидно, что эффективность подобных способов обеспечения независимости результатов измерений от колебаний напряжения на выходе ТН тесно связана с квалификацией и ответственностью персонала, выполняющего указанные измерения. Метрологическая легитимность таких измерений весьма сомнительна.

Недостатки метода:

*очень ограниченный температурный диапазон*, в котором возможно выполнять измерения потерь напряжения с требуемой точностью;

отсутствие методик выполнения измерений, которые учитывают дополнительную погрешность, обусловленную разностью температур воздуха, окружающих оба мультиметра;

*трудности с обеспечением высокой точности измерения потерь напряжения в условиях непостоянства напряжения на выходе ТН.*

Достоинства метода:

не требуется прокладка и последующее сматывания длинного измерительного кабеля.

Два следующих метода относятся к прямым измерениям потерь напряжения.

**Метод 4**

Потери напряжения измеряют, как относительную разность вторичного напряжения ТН и входного напряжения счетчика.

Этот метод, также как и метод 2, требует прокладки проводов, но он практически инвариантен к изменению напряжения на выходе ТН. Для измерения относительной разности напряжений на выходе ТН и счетчика используется прибор сравнения, предназначенный для поверки ТН методом сличения с эталонным трансформатором. В такой

роли может выступить, например, такой прибор, как СА507, у которого одной из измеряемых величин является именно относительная разность двух напряжений. Однако, СА507 должен быть укомплектован согласующим устройством СА5071, позволяющим корректно выполнить такие измерения, с точки зрения подключения.

Недостатки метода: высокая трудоемкость и необходимость использования средств связи, отсутствие утвержденной методики выполнения измерений.

Достоинства метода: высокая точность измерения потерь напряжения.

### **Метод 5**

Потери напряжения измеряют специализированным прибором

Анализ методов измерения потерь напряжения, а также анализ их недостатков, основные результаты которого приведены выше, позволили сделать вывод о необходимости разработки специализированного прибора для измерения потерь напряжения. Фирмой "ОЛТЕСТ" такая разработка была осуществлена и как результат – в настоящее время серийно выпускается измеритель потерь напряжения СА210.

Измеритель потерь напряжения СА210 (далее – измеритель) – современный специализированный прибор для измерения потерь напряжения во вторичных цепях однофазных и трехфазных трансформаторов напряжения, который обладает высокими метрологическими характеристиками и сконструирован с учетом условий выполнения измерений на энергетических объектах. При его разработке большое внимание было уделено не только обеспечению высоких метрологических характеристик, но и удобству работы с прибором, а также принятию мер, направленных на минимизацию ошибок персонала при проведении измерений.

СА210, получивший название измеритель потерь напряжения, по существу является универсальным прибором для контроля вторичных цепей трансформаторов тока и напряжения. Кроме потерь напряжения, им можно измерить мощности нагрузок ТН и трансформаторов тока (ТТ), в частности, активную, реактивную и полную мощности, коэффициент мощности и разность фаз между напряжением и током. Все это – без вывода оборудования из эксплуатации. Можно также измерить напряжение и ток (с помощью токоизмерительных клещей).

Измеритель СА210, является единственным прибором, который осуществляет прямые измерения потерь напряжения и имеет нормированные метрологические характеристики при их измерении в широком диапазоне температур при изменениях напряжения на выходе ТН:

- диапазон измерения потерь напряжения от минус 5 до 5%,

- пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при измерении потерь напряжения не более  $\pm (0,02 + 0,01\delta U) \%$ ;

- пределы дополнительной абсолютной погрешности при измерении потерь напряжения, вызванной разностью температур воздуха, окружающего переносной блок в момент синхронизации возле ТН и в момент измерения напряжения на зажимах счетчика, составляют  $\pm 0,001 \%$  на каждый  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  указанной разности температур.

Высокие метрологические характеристики при измерении потерь напряжения в реальных условиях выполнения работ на объектах энергетики были достигнуты благодаря применению масштабных преобразователей и источников опорного напряжения, имеющих исключительно высокую температурную стабильность характеристик, а также благодаря временной синхронизации измерений напряжений с погрешностью, не превышающей  $\pm 2 \text{ мс}$ .

Рассмотрим конкретные примеры вклада дополнительной погрешности, определяемой разностью температур.

Предположим, что температура воздуха в помещении, где установлены счетчики, составляет плюс  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а на месте установке ТН – минус  $10$ . В этом случае дополнительная погрешность измерения потерь напряжения, вызванная разностью температур, не выйдет за пределы  $\pm 0,03 \%$ . Если же температура на месте установки ТН будет плюс  $40$ , то пределы указанной дополнительной погрешности составят  $\pm 0,02 \%$ . Очевидно, что сумма указанных дополнительных погрешностей с основной погрешностью не выйдут за пределы  $\pm 0,08 \%$ , которые мы определили выше.

На рисунке 1 представлен внешний вид измерителя.



Рис.1

Измеритель выполнен в виде двух блоков (стационарного и переносного). Связь между стационарным и переносным блоками в режиме измерения потерь напряжения осуществляется с помощью инфракрасных приемопередатчиков при их совмещении.

Измерение потерь напряжения проводится путем синхронных фиксаций действующих значений напряжения первой гармоники, выполняемых стационарным блоком, подключенным к зажимам ТН, и переносным блоком, подключенным к зажимам счетчика. Таким образом, используемый метод измерения не требует прокладки измерительного кабеля между ТН и счетчиком.

Измерение потерь напряжения может выполняться по 2-х, 3-х и 4-х проводной схеме.

Перед измерением переносной и стационарный блоки в совмещенном состоянии подключаются к зажимам ТН, как показано на рисунке 2. При запуске измерения автоматически проводится синхронизация термокомпенсированных тактовых генераторов и взаимная градуировка измерительных трактов. Высокая стабильность тактовых генераторов обеспечивает синхронность измерений с погрешностью, не превышающей 2 мс за весь цикл измерений во всем температурном диапазоне.

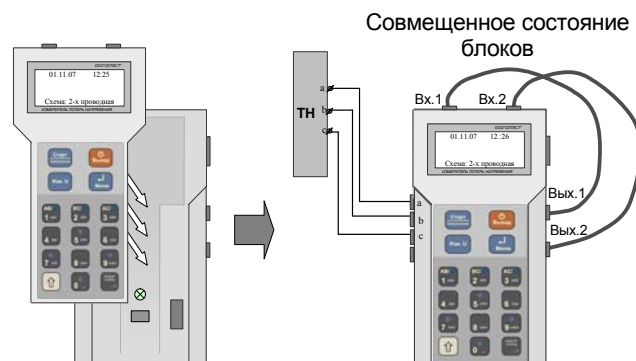


Рис. 2. Вариант подключения Измерителя СА210 к ТН по 3-х проводной схеме

На следующем этапе переносной блок отсоединяется от стационарного и поочередно подключается к каждой фазе на зажимах счетчика, как показано на рисунке 3. Измерения напряжений переносным блоком и стационарным блоком осуществляются синхронно. Результаты измерений напряжений автоматически заносятся в память.



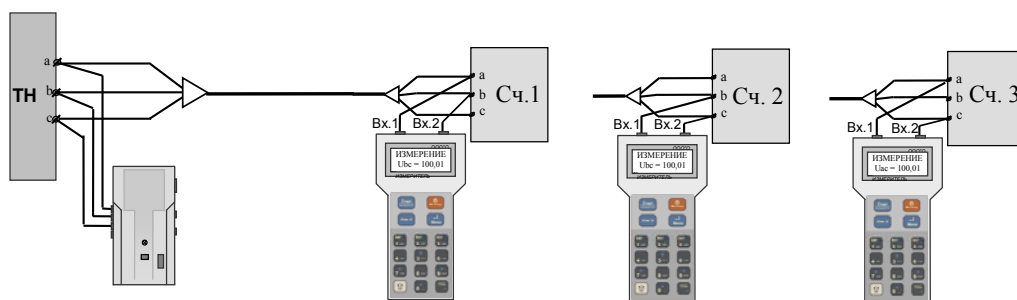


Рис. 3. Вариант подключения Измерителя СА210 для трехфазной цепи по 3-х проводной схеме

Если к одному ТН подключено более одного счетчика (до 10 счетчиков), измеритель позволяет последовательно провести измерения на всех счетчиках. После этого блоки совмещаются и производится автоматическая обработка результатов с последующим расчетом значений потерь напряжения по формуле (1).

Результаты измерения потерь напряжения автоматически заносятся в память измерителя и доступны для последующего просмотра. Архив рассчитан на сохранение результатов последних ста измерений. Возможно также считывание архива в память ПК через USB-порт, выполняемое с помощью устройства сопряжения, входящего в комплект измерителя.

Благодаря высокой степени автоматизации процесса измерения минимизировано влияние квалификации и аккуратности персонала на результаты измерения, а трудоемкость существенно снижена по сравнению с рассмотренными выше методами.

При измерении нагрузок ТН и ТТ измерение тока в СА210 осуществляется с помощью токоизмерительных клещей, что позволяет выполнять эти измерения без вывода оборудования из эксплуатации.

Измеритель потерь напряжения СА210 внесен в Госреестры средств измерительной техники: Украины (№У2763-08), Российской Федерации (№40951-09), Беларуси (№РБ 03 13 4089 09) и Казахстана (№KZ.02.03.03053-2009/У2763-08).

**Приведенный выше анализ позволяет заключить, что СА210:**

- **обладает уникальными метрологическими характеристиками, которые позволяют выполнять прямые измерения потерь напряжения (относительного падения напряжения) с высокой точностью в реальных условиях эксплуатации;**
- **не требует прокладки кабеля для проведения измерений;**

- позволяет измерить в одном цикле потери напряжения на линиях связи нескольких (до 10) счетчиков электрической энергии, подключенных к одному ТН;**
- позволяет измерить нагрузки трансформаторов напряжения и трансформаторов тока без вывода оборудования из эксплуатации;**
- благодаря высокой степени автоматизации процесса измерения, обеспечивает минимизацию влияния квалификации и аккуратности персонала на результаты измерения.**

#### Литература

1. Методические указания по определению погрешности измерения активной электроэнергии при ее производстве и распределении, РД 34.11.325-90, СО 153-34.11.325-90, ОРГРЭС Москва 1991
2. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., доп. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2005.
3. Методика выполнения измерений потерь напряжения в линиях соединения счетчика с измерительным трансформатором напряжения в условиях эксплуатации при выводе трансформатора напряжения из работы. МС 74094123.003-06
4. Методика выполнения измерений параметров нагрузки и вторичных цепей трансформаторов тока и напряжения прибором «Энергомонитор 3.3Т» в условиях эксплуатации. Аттестована ГЦИ СИ «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» 17.04.2007. Св.об аттестации №2203/131А-00340.
5. Лінія зв'язку лічильник електричної напруги – трансформатор напруги. Методика виконання вимірювання параметрів. МВВ 081/25.84 – 04 (действует в Украине).
6. Втрати напруги у вторинних колах однофазних та трифазних трансформаторів напруги на лінії зв'язку трансформатора напруги з лічильником електричної енергії. Методика виконання вимірювань. МВУ 037/08 – 2010 (действует в Украине).