

ресурс] – Режим доступа: Справочно – правовая система Техэксперт, <http://docs.cntd.ru/document/1200077909> (дата обращения 15.07.2020).

3.МУ 64–02–002–2002. Организация и порядок проведения метрологической экспертизы нормативной документации [Электронный ресурс] – Режим доступа: Справочно – правовая система Техэксперт, <http://docs.cntd.ru/document/1200032230> (дата обращения 14.04.2020).

4.РМГ 29–2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения [Электронный ресурс] – Режим доступа: Справочно – правовая система Техэксперт, <http://docs.cntd.ru/document/1200115154> (дата обращения 14.07.2020).

5.РДТ 04–2009. Метрологическая экспертиза нормативной и технической документации [Электронный ресурс] – Режим доступа: Справочно – правовая система Техэксперт, <http://docs.cntd.ru/document/1200077793> (дата обращения 14.07.2020).

6.Зайцева Д. Д., Грибов В.В., Шимов В.В. Метрологическая экспертиза и качество: Современные подходы при реализации // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 8. С. 21–23.

7.Минакова Н. П. Анализ и совершенствование метрологической экспертизы технической документации // Наука без границ. 2020. № 1(41). С. 36–41.

8.Полякова О. В. Метрологическая экспертиза технической документации. Часть 2 // Главный метролог. 2010. №1. С. 35–40.

9.Шкаруба Н. Ж. Менеджмент риска: Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся в сельскохозяйственных вузах по направлению подготовки 27.03.02 «Управление качеством». – М.: РГАУ-МСХА, 2018. – 174 с.

10.Шкаруба Н. Ж., Левщенко Е.А. Анализ основных элементов системы менеджмента измерений // Международный технико-экономический журнал. 2014. № 5. С. 41–46.

УДК 621.311.004.12
ГРНТИ 45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ УСТРОЙСТВ СОПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Большанин Георгий Анатольевич

к. т. н., доцент

Братский государственный университет,
ул. Макаренко, 40, г. Братск, Россия

Скулина Елена Георгиевна

магистрант

Новосибирский государственный технический университет,
пр. Карла Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия
DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.76.895

АННОТАЦИЯ

Показано исполнение устройств сопряжения средств контроля показателей качества электрической энергии с электроэнергетической системой в виде измерительных трансформаторов напряжения и шунтов переменного тока. Это является наиболее предпочтительным из-за отсутствия нелинейности в рабочей области магнитной характеристики. Показана схема замещения трансформатора, схемы исполнения опытов, в результате которых определяются необходимые параметры.

ABSTRACT

The execution of devices of interface of means of control of indicators of quality of electric energy with the electric power system in the form of measuring transformers of voltage and shunt of alternating current is shown. This is most preferable due to the lack of non-linearity in the working area of magnetic characteristics. A transformer substitution scheme is shown, as well as experiment execution schemes, as a result of which the necessary parameters are determined.

Ключевые слова: качество электрической энергии, опыт холостого хода, опыт короткого замыкания, трансформаторы, устройства сопряжения, напряжение, ток, ваттметр, амперметр, вольтметр.

Keywords: quality of electric energy, the idling experience, the short-circuit experience, transformers, interface devices, voltage, current, wattmeter, ammeter, voltmeter.

В современных электроэнергетических системах в больших количествах присутствуют нелинейные элементы. Именно поэтому современные электроэнергетические системы России не отличаются высоким качеством электрической энергии. В настоящее время проблема качества электрической энергии стала настолько актуальной [1–14], что ее игнорирование повлечет за собой срыв должного электроснабжения

промышленных и иных объектов. Выявление объектов, ответственных за нарушение качества электрической энергии, выполняется с целью определения рационального режима их работы. Показатели качества электрической энергии (ПКЭ) регламентируются действующим межгосударственным стандартом [1]. Установленные им нормативные значения ПКЭ соответствуют современным методам и средствам

их контроля. Они представляют собой количественную оценку таких характеристик электрической энергии, как отклонение частоты, напряжения и тока, а также несинусоидальность, несимметрия и колебания напряжений и токов.

Информацию о качестве электрической энергии могут нести ее основные характеристики, каковыми являются напряжения и токи. Необходимую информацию несут временные диаграммы этих характеристик. Необходимо обеспечить неизменность вида временных диаграмм напряжения и тока, найти такие устройства сопряжения, которые обеспечивают уменьшение количественных характеристик электрической энергии без искажения качественных. Задача устройств сопряжения средств контроля ПКЭ с ЭЭС заключается в формировании исходных данных, несущих информацию о качестве электрической энергии в этом или ином узле электроэнергетической системы.

Делители напряжения и шунты переменного тока используются только в маломощных электрических цепях. В качестве устройств сопряжения для автоматизированной системы активного контроля показателей качества электрической энергии в современных электроэнергетических системах, характеризуемых

напряжениями 10кВ и выше и большими по величине токами целесообразно использовать трансформаторы напряжения и трансформаторы тока (рис. 1).

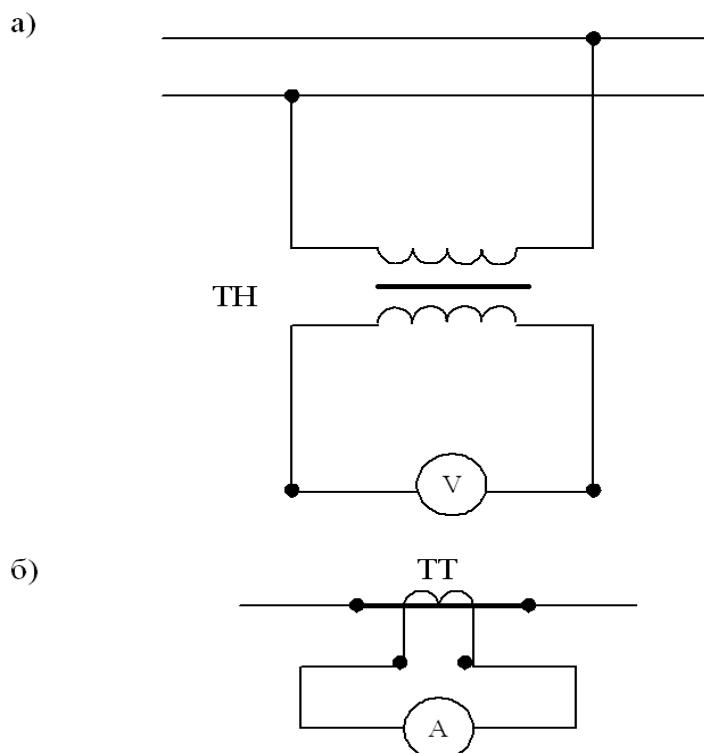
Использование измерительных трансформаторов в качестве устройств сопряжения наиболее предпочтительно из-за отсутствия нелинейности в рабочей области магнитной характеристики. Схема замещения трансформатора будет иметь вид (рис. 2). Ее параметры могут быть определены в результате серии опытов, периодически выполняемых для действующих трансформаторов. Обычно это опыты холостого хода и короткого замыкания. Схемы исполнения таких опытов представлены на рис. 3.

Из опыта холостого хода (рис. 3,а) можно определить параметры ветви намагничивания на частоте основной гармоники:

$$R_{10} = \frac{P_0}{I_{01}^2},$$

$$L_0 = \frac{\sqrt{U_{01}^2 I_{01}^2 - P_0^2}}{\omega I_{01}^2},$$

где P_0 , I_{01} и U_{01} – показания ваттметра, амперметра и вольтметра, подключенных к первичной обмотке.



*Рис. 1. Измерительные трансформаторы:
а – трансформатор напряжения (TH); б – трансформатор тока (TT)*

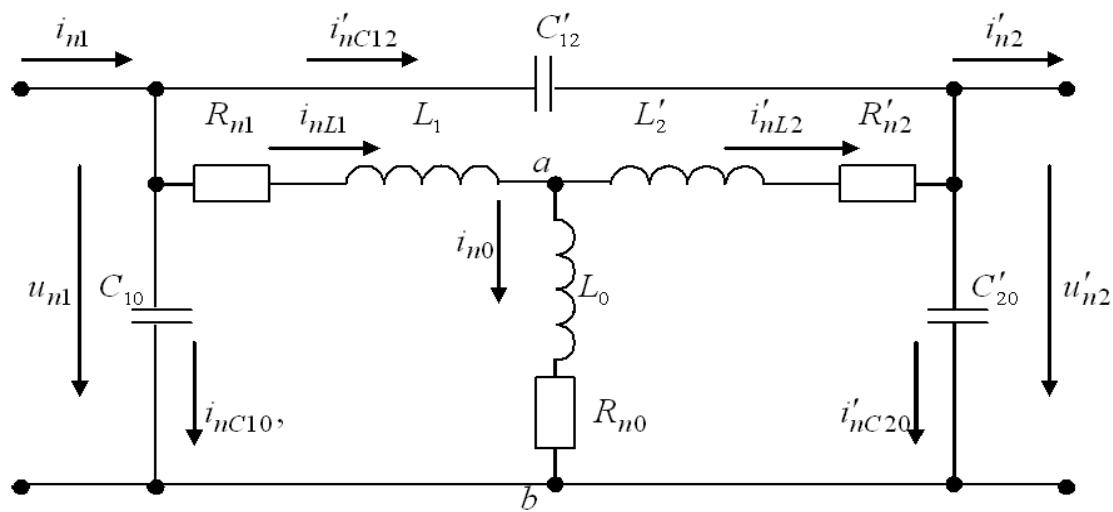


Рис. 2.. Схема замещения измерительного трансформатора

Параметры обмоток трансформатора определяются из опыта короткого замыкания. Способы определения прочих параметров схемы замещения трансформатора упоминались выше.

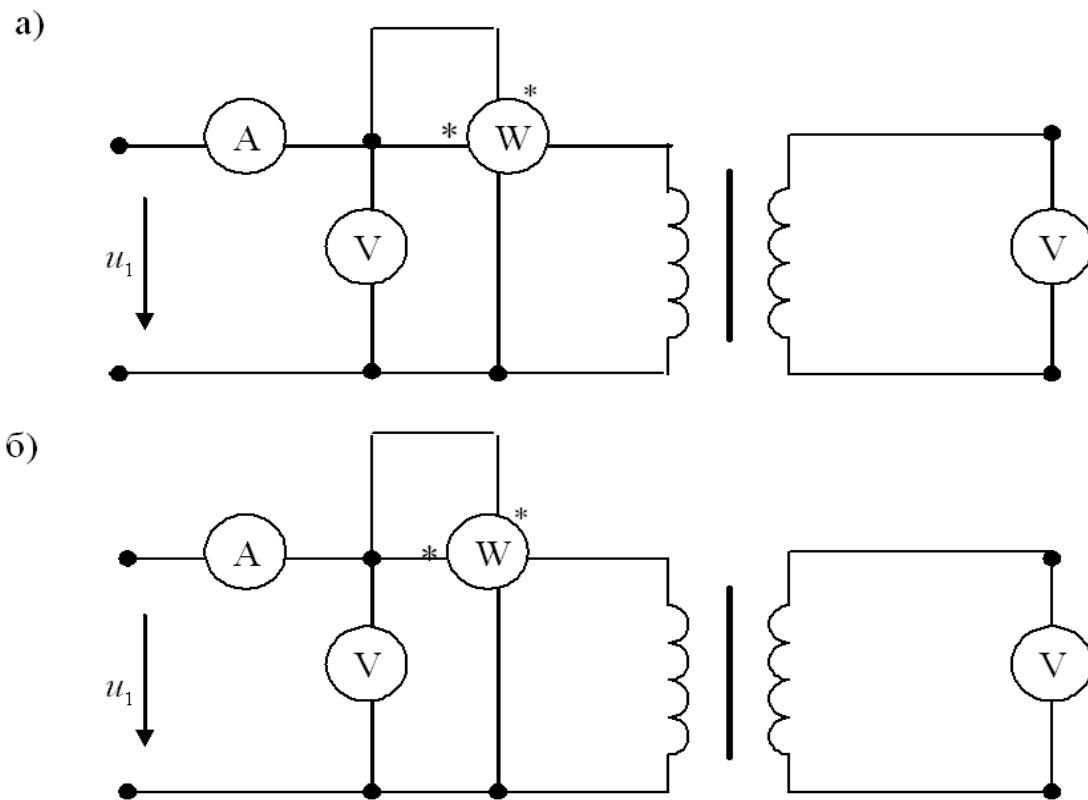


Рис. 3. Схемы опытов холостого хода (а) и короткого замыкания (б) трансформатора

Математическая модель измерительного трансформатора выглядит так:

$$\left. \begin{aligned} i_{L1n}R_{1n} + L_1 \frac{di_{L1n}}{dt} + i_{0n}R_{0n} + L_0 \frac{di_{0n}}{dt} - \frac{1}{c_{10}} \int i_{C10n} dt - u_{C10n}(0) = 0; \\ i'_{L2n}R'_{2n} + L'_2 \frac{di'_{L2n}}{dt} - i_{0n}R_{0n} - L_0 \frac{di_{0n}}{dt} + \frac{1}{c'_{20}} \int i'_{C20n} dt + u'_{C20n}(0) = 0; \\ i_{L1n}R_{1n} + L_1 \frac{di_{L1n}}{dt} + i'_{L2n}R'_{2n} + L'_2 \frac{di'_{L2n}}{dt} - \frac{1}{c'_{12}} \int i'_{C12n} dt - u'_{C12n}(0) = 0; \\ \frac{1}{c'_{12}} \int i'_{C12n} dt + u'_{C12n}(0) + \frac{1}{c'_{20}} \int i'_{C20n} dt + u'_{C20n}(0) - \frac{1}{c_{10}} \int i_{C10n} dt + u_{C10n}(0) = 0; \\ i_{1n} - i'_{C12n} - i_{L1n} - i_{C10n} = 0; \\ i_{L1n} - i_{0n} - i'_{L2n} = 0; \\ i'_{L2n} + i'_{C12n} - i'_{C20n} - i'_{2n} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Совместное решение уравнений (1) позволяет определить выходные характеристики

измерительного трансформатора на частоте n -й гармоники:

$$u_{2n} = \frac{\varpi_2 U_{1mn} \sin(n\omega t + \phi_{1in})}{\varpi_1}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} i_{2n} = & \frac{R_{1n}L_2 - R_{2n}L_1}{\varpi_2^2(R_{2n}^2 + n^2\omega^2L_2^2)} \varpi_1^2 n\omega I_{1mn} \cos(n\omega t + \phi_{1in}) - \\ & - \frac{R_{1n}R_{2n} + n^2\omega^2L_1L_2}{\varpi_2^2(R_{2n}^2 + n^2\omega^2L_2^2)} \varpi_1^2 I_{1mn} \sin(n\omega t + \phi_{1in}). \end{aligned} \quad (3)$$

Равенства (2) и (3) свидетельствуют о полном отсутствии влияния нелинейности магнитопровода на выходные характеристики трансформатора напряжения. Кроме того, получается, что на выходные характеристики не оказывают влияния и емкостные связи внутри трансформатора.

Чтобы получить достоверные сведения о величинах, характеризующих напряжение и ток в контролируемом месте электроэнергетической системы, необходимо выходные характеристики

измерительного трансформатора умножить на поправочные коэффициенты.

Поправочный коэффициент для напряжения на частоте каждой гармонической составляющей напряжения выглядит так:

$$k_{un} = \frac{u_{1n}}{u_{2n}} = \frac{\varpi_1}{\varpi_2}. \quad (4)$$

Поправочный коэффициент для тока на частоте n -й гармонической составляющей напряжения имеет вид

$$k_{in} = \frac{i_{nl}}{i_{2n}} = \frac{R_{2n}^2 + n^2\omega^2L_2^2}{\varpi_1^2 n\omega (R_{1n}L_2 - R_{2n}L_1)} \varpi_1^2 \operatorname{ctg}(n\omega t + \varphi_{1in}) - \frac{R_{2n}^2 + n^2\omega^2L_2^2}{\varpi_1^2 (R_{1n}R_{2n} + n^2\omega^2L_1L_2)}. \quad (5)$$

Из равенств (4) и (5) видно, что с помощью трансформатора напряжения достаточно удобно оценивать именно напряжение по поправочному коэффициенту k_{un} . Поправочный коэффициент для оценивания тока при посредстве трансформатора тока, судя по равенству (5), определяется несколько сложнее.

Из сказанного очевидна целесообразность исполнения устройств сопряжения средств контроля показателей качества электрической энергии с электроэнергетической системой в виде измерительных трансформаторов напряжения и шунтов переменного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

2. Ананичева, С.С. Качество электроэнергии. Регулирование напряжения и частоты в энергосистемах: учебное пособие / С. С. Ананичева, А. А. Алексеев, А. Л. Мызин.; 3-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ. 2012. – 93 с.

3. Висящев, А.Н. Качество электрической энергии и электромагнитная совместимость в электроэнергетических системах: Учеб. пособие в 2-х частях. / А.Н. Висящев. — Иркутск: Иркутский

государственный технический университет, 1997.
Ч. 1 — 187 с. Ч. 2 — 92 с.

4. Волгин, М.Е. Надежность и качество электрической энергии в системах электроснабжения: Учебное пособие для студентов электротехнических специальностей./ М.Е Волгин. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2008 . – 81 с.

5. Гаврилов, Ф.А. Качество электрической энергии. / Ф.А. Гаврилов.– Приазовский ГТУ, 2007. -96 с.

6. Герман, Л.А. Качество электрической энергии и его повышение в устройствах электроснабжения. Часть 1: Конспект лекций. / Л.А. Герман. – М.: РГОТУПС, 2004. – 46 с.

7. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / 4-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.,

8. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.

9. Карташев, И.И. Качество электроэнергии в системах электроснабжения. Способы его контроля и обеспечения / И.И. Карташев. – М.: Издательство МЭИ, 2000. – 120 с.

10. Климова, Г.Н., Литvak В. В., Маркман Г. З., Харлов Н. Н. Энергосбережение и качество электрической энергии: Учебное пособие. / Г.Н. Климова, В.В. Литvak, Г.З. Маркман, Н.Н. Харлов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 157 с.

11. Савина, Н.В. Качество электроэнергии: учебное пособие / Н.В. Савина. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2014. – 182 с.

12. Большанин, Г.А. Автоматизированная система активного контроля показателей качества электрической энергии / Г.А. Большанин. – Братск: БрГУ, 2006. – 152 с.

13. Большанин, Г.А. Коррекция качества электрической энергии / Г.А. Большанин. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 120 с.

14. Большанин, Г.А. Передача электрической энергии по ЛЭП одно-, двух- и трехпроводного исполнения / Г.А. Большанин. – Братск: Изд-во БрГУ, 2016. – 313 с.