

## 2.4.3. Электроэнергетика

Научная статья

УДК 620.9

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.4>

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПОЛНОЙ МОЩНОСТИ В СИЛОВЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ДВУХОБОМОТОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ, УЧИТЫВАЮЩАЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕРИ ОТ ВЫСШИХ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Сергей Сергеевич Костинский<sup>1\*</sup>, Александр Владимирович Богдан<sup>2</sup>,  
Евгений Иванович Сацук<sup>3</sup>, Александр Сергеевич Засыпкин<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова (д. 132, ул. Просвещения, Новочеркасск, 346428, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина (д. 13, ул. Калинина, Краснодар, 350044, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Системный оператор Единой энергетической системы (д. 7, Китайгородский проезд, Москва, 109012, Российская Федерация)

<sup>1</sup> mirovingen1987@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>

<sup>2</sup> alina48av@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6446-1286>

<sup>3</sup> satsuk-ei@so-ups.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3322-0417>

<sup>4</sup> zasandzas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2985-4619>

\* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** В последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической энергии в сетях промышленных и непромышленных потребителей, связанное с тем, что к ним подключается все больше электроприемников имеющих нелинейную вольтамперную характеристику и генерирующие в сеть высшие гармонические составляющие тока. Высшие гармонические составляющие тока создают дополнительные потери в обмотках трансформаторов и дополнительные потери на вихревые токи в магнитопроводе. Все это приводит к снижению эффективности процессов передачи электроэнергии и сокращению расчетного срока службы электрооборудования и электрических сетей. **Цель.** Разработать и апробировать методику для определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, учитывающую дополнительные потери от высших гармонических составляющих. **Материалы и методы.** Для реализации методики применяется Т-образная схема замещения силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, которая принимается симметричной. Для выполнения расчетов с использованием предлагаемой методики необходимы паспортные данные силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, а также данные (активная мощность, сила тока и напряжение), измеряемые для каждой из трех фаз и для каждой гармонической составляющей начиная с 1-й до 40-й с помощью измерительных приборов, установленных во вводной ячейке, питающей шины низшего напряжения трансформаторной подстанции, к которой подключен конечный потребитель электрической энергии. **Результаты и обсуждение.** Апробация разработанной методики выполнена на примере действующей системы электроснабжения питающей цех по цинкованию металла, в состав которой входит силовой трехфазный двухобмоточный трансформатор марки ТМЗ номинальной мощностью 1000 кВ·А. Измеренные данные о величине и гармоническом составе силы тока, активной мощности и напряжении питания, получены с помощью анализатора качества электрической энергии Энергомонитор 3.3 Т, установленного во вводной ячейке, питающей шины низшего напряжения трансформаторной подстанции. По итогам апробации рассчитано комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих. **Заключение.** Разработанная методика позволяет повысить точность определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения, за счет учета дополнительных потерь, связанных с наличием высших гармонических составляющих в системе электроснабжения, обусловленных наличием нелинейной электрической нагрузки.

**Ключевые слова:** высшие гармонические составляющие, потери мощности, Т-образная схема замещения, системы электроснабжения, силовой трехфазный двухобмоточный трансформатор

**Для цитирования:** Костинский С. С., Богдан А. В., Сацук Е. И., Засыпкин А. С. Методика определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, учитывающая дополнительные потери от высших гармонических составляющих // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 6 (105). С. 36–47. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.4>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.10.2024;

одобрена после рецензирования 05.11.2024;

принята к публикации 14.11.2024.

Research article

## A METHOD FOR DETERMINING THE COMPLEX VALUE OF TECHNICAL LOSSES OF FULL POWER IN POWER THREE-PHASE TWO-WINDING TRANSFORMERS WITH ACCOUNT OF ADDITIONAL LOSSES FROM HIGHER HARMONIC COMPONENTS

Sergey S. Kostinskiy<sup>1\*</sup>, Alexander V. Bogdan<sup>2</sup>, Evgeny I. Satsuk<sup>3</sup>, Alexander S. Zasyupkin<sup>4</sup>

<sup>1,4</sup> South-Russian State Polytechnic University (NPI) of the M. I. Platov (132, Prosveshcheniya str., Novocherkassk, 346428, Russian Federation)

<sup>2</sup> Kuban State Agrarian University (13, Kalinina str., Krasnodar, 350044, Russian Federation)

<sup>3</sup> System Operator of the Unified Energy System (7, Kitaygorodsky passage, Moscow, 109012, Russian Federation)

<sup>1</sup> mirovingen1987@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4209-532X>

<sup>2</sup> alina48av@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-6446-1286>

<sup>3</sup> satsuk-ei@so-ups.ru; <https://orcid.org/0009-0009-3322-0417>

<sup>4</sup> zasandzas@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2985-4619>

\* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** In recent years, there has been a significant deterioration in the quality of electrical energy in the networks of industrial and non-industrial consumers as more and more electric receivers with nonlinear volt-ampere characteristics generating higher harmonic current components in the network are connected to them. The higher harmonic components of the current create additional losses in the transformer windings and additional losses on eddy currents in the magnetic circuit. All this leads to a decrease in the efficiency of electricity transmission processes and a reduction in the estimated service life of electrical equipment and electrical networks. **Goal.** The study develops and test a methodology for determining the complex value of technical losses of full power in power three-phase two-winding transformers, taking into account additional losses from higher harmonic components. **Materials and methods.** To implement the technique, a T-shaped replacement circuit of a three-phase two-winding power transformer is used, which is assumed to be symmetrical. To perform calculations using the proposed technique, passport data of a three-phase two-winding power transformer are required. Along with the study requires the data (active power, current and voltage) measured for each of the three phases and for each harmonic component starting from the 1st to the 40th using measuring instruments installed in the input cell supplying low-voltage busbars of a transformer substation, to which the final consumer of electrical energy is connected. **Results and discussion.** The approbation of the developed methodology was carried out by the example of an existing power supply system supplying a metal galvanizing workshop, which includes a three-phase two-winding power transformer of the TMZ brand with a nominal capacity of 1000 kV·A. The measured data on the magnitude and harmonic composition of the current strength, active power and supply voltage were obtained using an electric energy quality analyzer Energomonitor 3.3 T installed in the input cell feeding the low-voltage busbars of a transformer substation. Based on the results of the approbation, the complex value of the technical losses of full power in a power three-phase two-winding transformer is calculated, taking into account additional losses from higher harmonic components. **Conclusion.** The developed technique makes it possible to increase the accuracy of determining the complex value of technical losses of full power in power three-phase double-winding transformers operated in urban and industrial power supply systems by taking into account additional losses associated with the presence of higher harmonic components in the power supply system due to the presence of a nonlinear electrical load.

**Keywords:** higher harmonic components, power loss, T-shaped replacement circuit, power supply systems, power three-phase two-winding transformer

**For citation:** Kostinskiy SS, Bogdan AV, Satsuk EI, Zasyupkin AS. A method for determining the complex value of technical losses of full power in power three-phase two-winding transformers with account of additional losses from higher harmonic components. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;6(105):36-47. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.6.4>

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 02.10.2024;

approved after reviewing 05.11.2024;

accepted for publication 14.11.2024.

**Введение / Introduction.** Потребление электроэнергии связано с использованием широкого спектра различных бытовых и промышленных электроприемников, которые для своей работы используют напряжение постоянного тока, получаемое путем выпрямления напряжения переменного тока и его сглаживания при помощи емкостного фильтра [1]. Для системы электроснабжения указанная аппаратура представляет собой нелинейную электрическую нагрузку и потребляет ток несинусоидальной формы. Это создает искажения в питающей сети и искажение напряжения, которое воздействует на иное оборудование, получающее электроэнергию от общего источника [2]. В последние годы отмечается значительное ухудшение качества электрической

энергии в сетях промышленных и непромышленных потребителей [3]. Ухудшение качества электроэнергии в распределительных сетях характерно для большинства развитых стран, т. к. остается все меньше электроприемников с линейными вольтамперными характеристиками [4].

Электроснабжение невозможно осуществить без применения трансформаторов, с помощью которых электроэнергия экономно передается на расстояние и рационально распределяется между потребителями. Трансформаторы, будучи неотъемлемой частью энергосистемы, имеются на всех ступенях напряжения и играют роль согласующего элемента между сетью и потребителем. Высшие гармонические составляющие тока создают дополнительные потери в обмотках трансформаторов и дополнительные потери на вихревые токи в магнитопроводе. Все это приводит к снижению эффективности процессов передачи электроэнергии и сокращению расчетного срока службы электрооборудования и электрических сетей из-за ускоренного теплового и электрического старения изоляции [5].

С целью оценки дополнительных потерь в элементах систем электроснабжения разработано значительное количество способов и методик. Например, в работе [6] предлагается способ определения технологических потерь электроэнергии в оборудовании тяговых подстанций, входящих в систему тягового электроснабжения. Однако при его применении фиксируются и анализируются показатели расхода электроэнергии, на основании разности которых технологические потери определяются по интервалам измерений, что не позволяет применять указанный способ для произвольного момента времени при различных величинах нагрузки силового трансформатора. Указанный способ также имеет высокую погрешность определения технических потерь, поскольку при оценке потерь в системе электроснабжения на основании разности расхода электроэнергии отсутствует возможность выделить технические потери ввиду наличия инструментальных потерь, а также расхода электроэнергии на собственные нужды подстанции. В работе [7] представлен способ определения комплексного значения совокупных технических потерь полной мощности в городских и промышленных системах электроснабжения. Однако при его использовании нет возможности выделить из комплексного значения совокупных технических потерь полной мощности в системе электроснабжения величину потерь отдельно в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе. Также при использовании указанного способа не учитываются дополнительные потери, связанные с наличием высших гармонических составляющих в системе электроснабжения, обусловленных наличием нелинейной электрической нагрузки, потребляющей ток несинусоидальной формы.

Таким образом, актуальной является задача разработки методики определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, учитывающей дополнительные потери от высших гармонических составляющих и рассматривающей в целом совокупность силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузки, связанных общим режимом работы.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** Для реализации предлагаемой методики необходимы паспортные данные силового трехфазного двухобмоточного трансформатора: потери ХХ ( $\Delta P_{XX}$ , кВт), потери короткого замыкания (КЗ) ( $\Delta P_{KЗ}$ , кВт), номинальная мощность ( $S_H$ , кВ·А), напряжение КЗ ( $u_{KЗ}$ , %), ток ХХ ( $I_{XX}$ , %), номинальное напряжение обмотки ВН ( $U_{ВН}$ , кВ), номинальное напряжение обмотки НН ( $U_{НН}$ , кВ), входящего в состав системы электроснабжения.

Используя перечисленные паспортные данные выполняют расчет номинального тока в обмотке ВН:

$$I_{НН} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{ВН}}, \text{ А.} \quad (1)$$

Далее вычисляют активное сопротивление обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_T = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot 10^3}{3 \cdot I_{1Н}^2}, \text{ Ом}, \quad (2)$$

полное сопротивление обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$Z_T = \frac{u_{КЗ} \cdot U_{ВН} \cdot 10^3}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot I_{1Н}}, \text{ Ом}, \quad (3)$$

и индуктивное сопротивление обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2}, \text{ Ом}. \quad (4)$$

Для реализации методики применяется Т-образная схема замещения силового трехфазного двухобмоточного трансформатора (рисунок 1), которая принимается симметричной, полагая комплексное значение полного сопротивления обмотки ВН равным приведенному комплексному значению полного сопротивления обмотки НН. Это допущение близко к действительности и не вносит ощутимых погрешностей в расчеты [8].

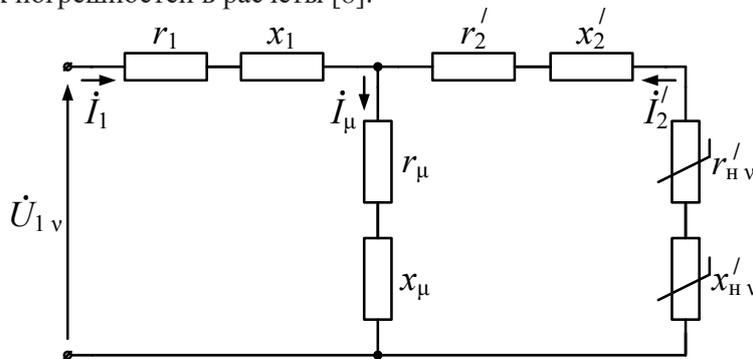


Рис. 1. Схема замещения одной фазы системы электроснабжения / Fig. 1. The scheme of substitution of one phase of the power supply system

Далее вычисляют активное сопротивление рассеяния обмотки ВН и приведенное активное сопротивление рассеяния обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_1 = r_2' = \frac{r_T}{2}, \text{ Ом}, \quad (5)$$

индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ВН и приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_1 = x_2' = \frac{x_T}{2}, \text{ Ом}. \quad (6)$$

После этого выполняют расчет номинального тока ХХ силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$I_{0Н} = \frac{I_{ХХ}}{100} \cdot I_{1Н}, \text{ А}. \quad (7)$$

Далее, используя полученное значение номинального тока ХХ, рассчитывают совокупное активное сопротивление ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_0 = \frac{\Delta P_{ХХ} \cdot 10^3}{3 \cdot I_{0Н}^2}, \text{ Ом}, \quad (8)$$

совокупное полное сопротивление ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$Z_0 = \frac{U_{\text{ВН}} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot I_{0\text{Н}}}, \text{ Ом}, \quad (9)$$

и совокупное индуктивное сопротивление ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}, \text{ Ом}. \quad (10)$$

Зная величины активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки ВН, находят активное сопротивление ветви намагничивания силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_{\mu} = r_0 - r_1, \text{ Ом}, \quad (11)$$

и индуктивное сопротивление ветви намагничивания силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_{\mu} = x_0 - x_1, \text{ Ом}. \quad (12)$$

На основании данных (активная мощность, потребляемая нагрузкой, подключенной к силовому трехфазному двухобмоточному трансформатору ( $P_{\text{н}v}$ , Вт), сила тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке ( $I_{\text{н}v}$ , А); напряжение на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке ( $U_{\text{н}v}$ , В), где  $v$  – порядковый номер гармонической составляющей), измеряемых для каждой из трех фаз и для каждой гармонической составляющей начиная от

1-й до 40-й с помощью измерительных приборов (анализаторы качества электрической энергии, измерители параметров электрической сети), установленных во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции (ТП), к которой подключен конечный потребитель электрической энергии (нагрузка), вычисляют активное сопротивление основной ( $v = 1$ ) гармонической составляющей нагрузки для одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r_{\text{н}1} = \frac{P_{\text{н}1}}{I_{\text{н}1}^2}, \text{ Ом}, \quad (13)$$

полное сопротивление основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$Z_{\text{н}1} = \frac{U_{\text{н}1}}{I_{\text{н}1}}, \text{ Ом}, \quad (14)$$

и реактивное (индуктивное) сопротивление основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x_{\text{н}1} = \sqrt{Z_{\text{н}1}^2 - r_{\text{н}1}^2}, \text{ Ом}. \quad (15)$$

Вычисления активного, полного и реактивного сопротивлений, аналогичные выполненным ранее для основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, проводят для остальных гармонических составляющих нагрузки этой фазы от 2-й до 40-й, получая значения  $r_{\text{н}2 \dots 40}$ ,  $Z_{\text{н}2 \dots 40}$  и  $x_{\text{н}2 \dots 40}$ .

Зная коэффициент трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, равный

$$k_{\text{т}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}}, \text{ о. е.}, \quad (16)$$

находят приведенное активное сопротивление для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$r'_{\text{HV}} = r_{\text{HV}} \cdot k_{\text{T}}^2, \text{ Ом}, \quad (17)$$

и приведенное реактивное сопротивление для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$x'_{\text{HV}} = x_{\text{HV}} \cdot k_{\text{T}}^2, \text{ Ом}, \quad (18)$$

а также приведенное комплексное полное сопротивление для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора:

$$\underline{Z}'_{\text{HV}} = r'_{\text{HV}} + jx'_{\text{HV}}. \quad (19)$$

Зная вычисленные ранее параметры Т-образной схемы замещения одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора (рисунок 1), для каждой гармонической составляющей рассчитывают следующие значения:

$$\alpha_v = 2(r'_{\mu} r'_2 + v^2 \cdot x_{\mu} x'_2); \beta_v = (r_{\mu}^2 + v^2 \cdot x_{\mu}^2); \gamma_v = (r'_2)^2 + v^2 \cdot (x'_2)^2;$$

$$\delta_v = (r_1^2 + v^2 \cdot x_1^2); \theta_v = 2 \cdot (r_1 r_{\mu} + v^2 \cdot x_1 x_{\mu}); \varepsilon_v = v \cdot (x_1 + x'_2);$$

$$\tau_v = 2 \cdot (r_1 r'_2 + v^2 \cdot x_1 x'_2); \mu_v = r_1 + r'_2.$$

С использованием вычисленных значений ( $\alpha_v$ ,  $\beta_v$ ,  $\gamma_v$ ,  $\delta_v$ ,  $\theta_v$ ,  $\varepsilon_v$ ,  $\tau_v$  и  $\mu_v$ ) для каждой гармонической составляющей, с целью расчета потерь в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, учитывая дополнительные потери от высших гармонических составляющих, вычисляют условно-постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей:

$$A_{1v} = \beta_v \cdot \mu_v + \gamma_v \cdot B_{1v} + \alpha_v \cdot r_1;$$

$$B_{1v} = (r_1 + r_{\mu}); B_{2v} = 2(B_{1v} \cdot r'_2 + r_{\mu} \cdot r_1); B_{3v} = 2(B_{1v} \cdot v \cdot x'_2 + v \cdot x_{\mu} \cdot r_1);$$

$$A_{2v} = \beta_v \cdot \varepsilon_v + \gamma_v \cdot D_{1v} + \alpha_v \cdot v \cdot x_1;$$

$$D_{1v} = v \cdot (x_1 + x_{\mu}); D_{2v} = 2(D_{1v} \cdot r'_2 + v \cdot r_{\mu} \cdot x_1);$$

$$D_{3v} = 2(D_{1v} \cdot v \cdot x'_2 + v^2 \cdot x_{\mu} \cdot x_1);$$

$$A_{3v} = \beta_v (\delta_v + \gamma_v + \tau_v) + \gamma_v (\delta_v + \theta_v) + \delta_v \cdot \alpha_v;$$

$$C_{1v} = \beta_v + \delta_v + \theta_v; C_{2v} = 2 \cdot [\delta_v (r_{\mu} + r'_2) + \beta_v \cdot \mu_v + \theta_v \cdot r'_2];$$

$$C_{3v} = 2 \cdot [\delta_v \cdot v \cdot (x_{\mu} + x'_2) + \beta_v \cdot \varepsilon_v + \theta_v \cdot v \cdot x'_2].$$

Используя рассчитанные условно-постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей, а также величины приведенных активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, вычисляют комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей:

$$\Delta \dot{S}_{\text{TV}} = (U_{\text{HV}} \cdot k_{\text{T}})^2 \cdot \left[ \frac{A_{1v} + B_{1v} (Z'_{\text{HV}})^2 + B_{2v} r'_{\text{HV}} + B_{3v} x'_{\text{HV}} + j(A_{2v} + D_{1v} (Z'_{\text{HV}})^2 + D_{2v} r'_{\text{HV}} + D_{3v} x'_{\text{HV}})}{A_{3v} + C_{1v} (Z'_{\text{HV}})^2 + C_{2v} r'_{\text{HV}} + C_{3v} x'_{\text{HV}}} \right]. \quad (20)$$

Суммируя комплексные значения потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, рассчитанные для каждой гармонической составляющей, находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих:

$$\Delta \dot{S}_{\Sigma L1} = \sum_{v=1}^{40} \Delta \dot{S}_{tv} . \quad (21)$$

Для оставшихся двух фаз ( $L2$  и  $L3$ ), используя в качестве исходных данных измеренные активную мощность, потребляемую нагрузкой, подключенной к силовому двухобмоточному трансформатору, силу тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузку и напряжение на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и на нагрузке, для каждой гармонической составляющей начиная от 1-й до 40-й, проводят аналогичные описанным ранее для фазы  $L1$  расчетные действия, с целью получить значения  $\Delta \dot{S}_{\Sigma L2}$  и  $\Delta \dot{S}_{\Sigma L3}$ .

Сложив комплексные значения суммарных потерь полной мощности, вычисленные для каждой фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих:

$$\Delta \dot{S}_{\Sigma} = \Delta \dot{S}_{\Sigma L1} + \Delta \dot{S}_{\Sigma L2} + \Delta \dot{S}_{\Sigma L3} .$$

Параметры ( $P_{нv}$ ,  $I_{нv}$ ,  $U_{нv}$ ), измеряемые с помощью измерительных приборов для каждой фазы, могут быть заданы произвольно, что позволит рассчитать потери полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих для произвольного момента времени при различных величинах нагрузки.

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Рассмотрим пример апробации разработанной методики на примере действующей системы электропитания, питающей цех по цинкованию металла, в состав которой входит силовой трехфазный двухобмоточный трансформатор марки ТМЗ номинальной мощностью 1000 кВА, с номинальными напряжениями обмоток ВН – 10 кВ и НН – 0,4 кВ.

Однолинейная принципиальная электрическая схема рассматриваемой системы электропитания приведена на рисунке 1, а номинальные параметры силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, используемого для транспортировки электрической энергии конечному потребителю и эксплуатируемого в рассматриваемой системе электропитания, приведены в таблице 1.

Используя номинальные параметры силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, приведенные в таблице 1, в соответствии с выражением (1) рассчитывается значение номинального тока в обмотке ВН. Используя формулы (2)–(4) вычисляют активное, полное и индуктивное сопротивления обмоток силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. По формулам (5) и (6) вычисляют активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки ВН и приведенные активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Используя выражение (7), выполняют расчет номинального тока ХХ силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Используя формулы (8)–(10) рассчитывают совокупные активное, полное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания и ветви рассеяния обмотки ВН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. По формулам (11) и (12), зная величины активного и индуктивного сопротивлений ветви рассеяния обмотки ВН, вычисляют активное и индуктивное сопротивления ветви намагничивания силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Таблица 1 / Table 1

**Номинальные параметры силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, эксплуатируемого в рассматриваемой системе электроснабжения / Nominal parameters of a three-phase two-winding power transformer operated in the considered power supply system**

Номинальная мощность ( $S_n$ )	1000 кВ·А
Потери короткого замыкания ( $\Delta P_{K3}$ )	10,8 кВт
Потери холостого хода ( $\Delta P_{XX}$ )	1,6 кВт
Ток холостого хода ( $I_{XX}$ )	0,75 %
Напряжение короткого замыкания ( $u_{K3}$ )	5,83 %
Номинальное напряжение обмотки ВН ( $U_{ВН}$ )	10 кВ
Номинальное напряжение обмотки НН ( $U_{НН}$ )	400 В

Расчетные параметры схемы замещения для одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, представленной на рисунке 1, приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры схемы замещения для одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора / Parameters of the substitution circuit for a single phase of a three-phase two-winding power transformer**

Наименование	Величина
Активное сопротивление рассеяния обмотки ВН ( $r_1$ )	0,54 Ом
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ВН ( $x_1$ )	2,86 Ом
Активное сопротивление ветви намагничивания ( $r_\mu$ )	2,84 кОм
Индуктивное сопротивление ветви намагничивания ( $x_\mu$ )	13,02 кОм
Приведенное активное сопротивление рассеяния обмотки НН ( $r_2'$ )	0,54 Ом
Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки НН ( $x_2'$ )	2,86 Ом

Измеренные данные, полученные с помощью анализатора качества электрической энергии Энергомонитор 3.3 Т, установленного во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции, для фазы L1 для гармонических составляющих нагрузки от 1-й до 40-й приведены на рисунке 2.



а



б



в

Рис. 2. Гистограммы гармонических составляющих от 1-й до 40-й для фазы L1: измеренные с помощью анализатора качества электрической энергии Энергомонитор 3.3 Т, установленного во вводной ячейке, питающей шины НН трансформаторной подстанции: а – напряжения; б – силы тока; в – активной мощности / Fig. 2. Histograms of harmonic components from the 1st to the 40th for the L1 phase: measured using an electric energy quality analyzer Energy monitor 3.3 T installed in the input cell feeding the NN bus of a transformer substation: a – voltage; b – current; c – active power

Используя измеренные данные, в соответствии с выражениями (13)–(15) рассчитываются активное, полное и реактивное сопротивления основной гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора. Аналогично, используя выражения (13)–(15) и результаты измерений для остальных гармонических составляющих (рисунок 2), выполняют расчет активных, полных и реактивных сопротивлений гармонических составляющих нагрузки от 2-й до 40-й одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Используя значения номинальных напряжений обмоток ВН и НН, приведенные в таблице 1, вычисляют значение коэффициента трансформации силового трехфазного двухобмоточного трансформатора по формуле (16), которое составит 25. Используя значение коэффициента трансформации и выражения (17)–(19), рассчитывают приведенные активное, реактивное и полное со-

противления для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, подключенной к выводам обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора.

Зная вычисленные ранее параметры схемы замещения одной фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора, представленные в таблице 2, для каждой гармонической составляющей рассчитывают значения  $(\alpha_v, \beta_v, \gamma_v, \delta_v, \theta_v, \varepsilon_v, \tau_v \text{ и } \mu_v)$  и, используя эти значения, вычисляют условно-постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей  $(A_{1v}, A_{2v}, A_{3v}, B_{1v}, B_{2v}, B_{3v}, C_{1v}, C_{2v}, C_{3v}, D_{1v}, D_{2v}, D_{3v})$ .

Используя рассчитанные условно-постоянные коэффициенты для каждой гармонической составляющей, а также величины приведенных активного, полного и реактивного сопротивлений для каждой гармонической составляющей нагрузки одной фазы, в соответствии с формулой (20), вычисляют комплексные значения потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора для каждой гармонической составляющей от 1-й до 40-й.

Суммируя комплексные значения потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе, рассчитанные для каждой гармонической составляющей от 1-й до 40-й, в соответствии с формулой (21), находят комплексное значение суммарных потерь полной мощности в одной фазе силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, которые равны:

$$\Delta \dot{S}_{\tau\Sigma L1} = 850,7063 + 4202,663i \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Для оставшихся двух фаз ( $L2$  и  $L3$ ), используя в качестве исходных данных измеренные активную мощность, потребляемую нагрузкой, подключенной к силовому двухобмоточному трансформатору; силу тока в обмотке НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке; напряжение на зажимах обмотки НН силового трехфазного двухобмоточного трансформатора и нагрузке, для каждой гармонической составляющей начиная от 1-й до 40-й, проводят аналогичные описанным ранее для фазы  $L1$  расчетные действия. По итогам выполненных расчетов

$$\Delta \dot{S}_{\tau\Sigma L2} = 899,532 + 4457,926i \text{ В} \cdot \text{А}.$$

$$\Delta \dot{S}_{\tau\Sigma L3} = 869,2211 + 4310,247i \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Сложив комплексные значения суммарных потерь полной мощности, вычисленные для каждой фазы силового трехфазного двухобмоточного трансформатора с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих, рассчитывают комплексное значение технических потерь полной мощности в силовом трехфазном двухобмоточном трансформаторе с учетом дополнительных потерь от высших гармонических составляющих:

$$\Delta \dot{S}_{\tau\Sigma} = 2619,459 + 12970,84i \text{ В} \cdot \text{А}.$$

**Заключение / Conclusion.** Разработанная методика позволяет повысить точность определения комплексного значения технических потерь полной мощности в силовых трехфазных двухобмоточных трансформаторах, эксплуатируемых в городских и промышленных системах электроснабжения, за счет учета дополнительных потерь, связанных с наличием высших гармонических составляющих в системе электроснабжения, обусловленных наличием нелинейной электрической нагрузки, потребляющей ток несинусоидальной форм [9, 10]. При этом для реализации методики необходимо использовать известные паспортные данные силового трансформатора и измеряемые на зажимах обмотки низшего напряжения силового трехфазного двухобмоточного трансформатора значения активной мощности, силы тока и напряжения для каждой гармонической составляющей.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Чернышева Д. В. Влияние несинусоидальности напряжения и тока на элементы системы электропитания // Известия Юго-Западного государственного университета. Техника и технологии. 2012. № 2-1. С. 100–105.
2. Прищепа Д. Н., Загруднинов Ю. А. Негативное воздействие нелинейной нагрузки на систему электропитания // Труды Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского. 2014. № 644. С. 199–203.
3. Боярская Н. П., Темербаев С. А., Довгун В. П. [и др.]. Анализ спектрального состава токов и напряжений светодиодных и газоразрядных источников света // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2013. № 8. С. 180–184.
4. Лещинская Т. Б., Таранов М. М. Исследование токов эмиссии бытовых электроприемников // Вестник Московского государственного агроинженерного университета им. В. П. Горячкина. 2009. № 2. С. 54–61.
5. Гужов С., Полищук А., Туркин А. Сети уличного освещения с полупроводниковыми управляющими устройствами и источниками света: управление и расчет режимов // Полупроводниковая светотехника. 2009. № 1. С. 42–46.
6. Способ определения технологических потерь электроэнергии на тягу на тяговых подстанциях постоянного тока железнодорожного транспорта: патент РФ № 2573098 МПК В60М 3/00, G01R 21/133 / Каштанов А. Л., Незевак В. Л., Никифоров М. М., Ушаков С. Ю., Черемисин В. Т. 2016.
7. Способ определения комплексного значения совокупных потерь полной мощности в городских и промышленных системах электроснабжения: патент РФ № 2815674 МПК G01R 21/133 / Костинский С. С., Ливенцов В. С. 2024.
8. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины и микромашины: учеб. для электротехн. спец. вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1987. 528 с.
9. Singh G. K. Power system harmonics research: a survey // European Transactions on Electrical Power. 2009. Vol. 19. Issue 2. P. 151–172.
10. Jaisiva S., Neelan S., Ilansezhan T. Harmonic analysis in non-linear loads of power system // International Research Journal of Engineering and Technology. 2016. Vol. 3. Issue 5. P. 1474–1478.

**REFERENCES**

1. Chernysheva DV. The Effect of Non-sinusoidal Voltage and Current on the Elements of the Power Supply System. Proceedings of the Southwestern State University. Engineering and Technology. 2012;(2-1):100-105. (In Russ.).
2. Prishchepa DN, Zagrudnikov YuA. Negative Impact of Non-linear Load on the Power Supply System. Proceedings of the Military Space Academy Named After AF. Mozhaisky. 2014;(644):199-203. (In Russ.).
3. Boyarskaya NP, Temerbaev SA, Dovgun VP, et al. Analysis of the Spectral Composition of Currents and Voltages of LED and Gas-discharge Light Sources. Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2013;(8):180-184. (In Russ.).
4. Leshchinskaya TB, Taranov MM. Investigation of the Emission Currents of Household Electric Receivers. Bulletin of the VP. Goryachkin Moscow State Agroengineering University. 2009;(2):54-61. (In Russ.).
5. Guzhov S, Polishchuk A, Turkin A. Street Lighting Networks with Semiconductor Control Devices and Light Sources: Control and Calculation of Modes. Semiconductor Lighting Engineering. 2009;(1):42-46. (In Russ.).
6. A Method for Determining Technological Losses of Electric Power for Traction at DC Traction Substations of Railway Transport. Patent RF No. 2573098 МПК В60М 3/00, G01R 21/133. Kashtanov AL, Nezevak VL, Nikiforov MM, Ushakov SYu, Cheremisin VT. 2016. (In Russ.).
7. A method for Determining the Complex Value of Total Power Losses in Urban and Industrial Power Supply Systems. Patent RF, No. 2815674 МПК G01R 21/133. Kostinskiy SS, Liventsov VS. 2024. (In Russ.).
8. Bruskin DE, Zorokhovich AE, Khvostov VS. Electric Machines and Micromachines: Studies. for Electrical Engineering Special Universities. 3-rd ed., reprint and add. Moscow: Higher School; 1987. 528 p. (In Russ.)
9. Singh GK. Power system harmonics research: a survey. European Transactions on Electrical Power. 2009;19(2):151-172.
10. Jaisiva S, Neelan S, Ilansezhan T. Harmonic analysis in non-linear loads of power system. International Research Journal of Engineering and Technology. 2016;3(5):1474-1478.

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

- Сергей Сергеевич Костинский** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроснабжения и электропривода (ЭиЭ) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Scopus ID: 57191409967, Researcher ID: ABG-7265-2020.
- Александр Владимирович Богдан** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии Кубанского государственного аграрного университета имени И. Т. Трубилина (КубГАУ), Scopus ID: 57194594501, Researcher ID: LTF-6495-2024.
- Евгений Иванович Сацук** – доктор технических наук доцент, начальник службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики, АО «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»), Scopus ID: 6504794703, Researcher ID: LTF-5597-2024.
- Александр Сергеевич Засыпкин** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрических станций и электроэнергетических систем (ЭСиЭЭС) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова (ЮРГПУ), Scopus ID: 6602173548, Researcher ID: LSJ-8094-2024.

### ВКЛАД АВТОРОВ

- Сергей Сергеевич Костинский.** Формулирование цели исследования. Проведение исследования – разработка методики, сбор, интерпретация и анализ полученных результатов. Подготовка и редактирование текста рукописи. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.
- Александр Владимирович Богдан.** Интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.
- Евгений Иванович Сацук.** Формулирование цели исследования. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта.
- Александр Сергеевич Засыпкин.** Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

- Sergey S. Kostinskiy** – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor of Department of Electric Power Systems and Electric Drive, South-Russian State Polytechnic University, Scopus ID: 57191409967, Researcher ID: ABG-7265-2020.
- Alexander V. Bogdan** – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department Electrical Engineering, Thermal Engineering and Renewable Energy Sources, Kuban State Agrarian University, Scopus ID: 57194594501, Researcher ID: LTF-6495-2024.
- Evgeny I. Satsuk** – Dr. Sci. (Tech.), Head of the Emergency and Regime Automation Implementation Service, System Operator of the Unified Energy System, Scopus ID: 6504794703, Researcher ID: LTF-5597-2024
- Alexander S. Zasyupkin** – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Electric Power Plants and Electric Power Systems, South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, Scopus ID: 6602173548, Researcher ID: LSJ-8094-2024.

### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

- Sergey S. Kostinskiy.** Formulation of the research objective. Conducting a study is the development of a methodology, collection, interpretation and analysis of the results obtained. Preparation and editing of the text of the manuscript. The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.
- Alexander V. Bogdan.** Interpretation and analysis of the received data. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version, participation in scientific design.
- Evgeny I. Satsuk.** Formulation of the research objective. Preparation and editing of the text – drafting the manuscript and forming its final version
- Alexander S. Zasyupkin.** Text preparation and editing – drafting a manuscript and forming its final version.