

УДК 621.31

Калюжный Дмитрий Николаевич, канд. техн. наук, доцент кафедры систем электроснабжения и электропотребления городов Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, г. Харьков, Украина. Ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002. Тел. 050-560-68-35. E-mail: KalyuzhniyDN@mail.ru. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-0734>.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИСКАЖЕНИЙ В МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ФАКТИЧЕСКИХ ВКЛАДОВ В ИСКАЖЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОЧКЕ ОБЩЕГО ПРИСОЕДИНЕНИЯ

Рассмотрены основные линейные источники искажений напряжений в системах электроснабжения, которые вызывают отклонение и несимметрию напряжений. Предложены схемы их замещения в пространстве фазных составляющих с отдельно выделенными неискажающими и искажающими частями. Разработаны выражения для определения параметров неискажающих и искажающих частей схем замещения линейных источников искажения напряжений.

Ключевые слова: искажение напряжения, источник искажений, схема замещения, фактический вклад, точка общего присоединения.

Калюжный Дмитро Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедры систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна. Вул. Революції, 12. м. Харків, Україна, 61002. Тел. 050-560-68-35. E-mail: KalyuzhniyDN@mail.ru. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-0734>.

ПРЕДСТАВЛЕННЯ ЛІНІЙНИХ ДЖЕРЕЛ СПОТВОРЕНЬ У МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ РОЗПОДІЛУ ЇХ ФАКТИЧНИХ ВНЕСКІВ У СПОТВОРЕННЯ НАПРУГ У ТОЧЦІ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЄДНАННЯ

Розглянуті основні лінійні джерела спотворень напруг у системах електропостачання, які викликають відхилення й несиметрію напруг. Запропоновані схеми їхнього заміщення у просторі фазних складових з окремо виділеними частинами, які не спотворюють та спотворюють напругу. Розроблені вирази для визначення параметрів частин схем заміщення лінійних джерел спотворення, які не спотворюють та спотворюють напругу.

Ключові слова: спотворення напруги, джерело спотворення, схема заміщення, фактичний внесок, точка загального приєднання.

Kalyuzhniy Dmitry Nikolayovich, Ph. D. Associate prof. of the Department of electrical supply and energy consumption systems of cities O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine. Str. Revolutsii, 12, Kharkiv, Ukraine, 61002. Tel. 050-560-68-35. E-mail: KalyuzhniyDN@mail.ru. ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7374-0734>.

PRESENTATION OF LINEAR SOURCES OF DISTORTION IN THE MATHEMATICAL MODELS OF THEIR FACTUAL CONTRIBUTION DISTRIBUTION IN VOLTAGE DISTORTION AT THE POINT OF COMMON COUPLING

To review the ways of presentation and determination of parameters of equivalent circuits of voltage distortion linear sources of power supply systems with separate dedicated undistorted and distorted parts. Methodology. The principle of distorted parts separation of voltage distortion linear sources equivalent circuits is based on the determination of their deviation from the undistorted state. The calculation of equivalent circuits' parameters is performed on the basis of main laws of electrical engineering. Results. Equivalent circuit of distorted and undistorted parts of power supply system can be represented as a series connection of active elements. All the other elements of the power supply systems and electric power consumers may be presented as a series or parallel connection of passive elements. Originality. Isolation of linear distortion sources of undistorted and distorted parts in equivalent circuits can determine their factual contribution to voltage distortion at the point of common coupling in the form of an algebraic sum. Practical value. The results of the research can be used in the mathematical models of solving the problem of factual contributions distribution of linear sources of distortion in voltage distortion at the point of common coupling.

Keywords: voltage distortion, sources of distortion, equivalent circuit, factual contribution, the point of common coupling.

Введение

Понижение качества электрической энергии (КЭ) в системах электроснабжения (СЭС) является следствием действия в них различных источников искажений (ИИ). Ими могут быть как потребители электрической энергии (ЭЭ), так и элементы электрических сетей (ЭС). Независимо от принадлежности ИИ передача и потребление ЭЭ пониженного качества вызывает экономические убытки у всех участников рынка ЭЭ. Величина этих убытков может

достигать нескольких миллионов евро за одно событие понижения КЭ [1]. Годовые экономические убытки для отдельных стран составляют порядка 10-20 млрд долл. США [2]. Учитывая финансовые отношения между поставщиком и потребителем ЭЭ, компенсация убытков потерпевшей стороне является очевидной. С практической точки зрения данный вопрос сводится к решению задачи распределения фактических вкладов (ФВ) ИИ напряжений СЭС в искажение напряжений в точке общего присоединения (ТОП) [3, 4].

Описание проблемы

Одно из направлений решения задачи распределения ФВ линейных ИИ напряжений СЭС в искажение напряжений в ТОП базируется на использовании математической модели, составленной в пространстве фазных составляющих с учетом распределенного характера ИИ [5]. Ее отличительной особенностью является представление линейных ИИ с отдельно выделенными в них неискажающими (неиск) и искажающими (иск) частями:

$$(Y_{неиск} + Y_{иск}) \times (\Phi_{неиск} + \Phi_{иск}) = I_{неиск} + I_{иск}, \quad (1)$$

где Y , Φ и I – матрицы метода узловых потенциалов.

Представление линейных ИИ с отдельно выделенными в них неискажающими и искажающими частями приводит к задаче составления и определения параметров схем их замещения.

Цель исследования. Рассмотреть способы представления и определения параметров неискажающих и искажающих частей схем замещения линейных ИИ напряжений СЭС.

Основные материалы исследования

Рассмотрим СЭС (рис. 1) потребителей ЭЭ (П), состоящую из источника питания (ИП) и ЭС с такими элементами, как линии электропередачи (ЛЭП) и трансформаторы (Т).



Рис. 1. Система электроснабжения потребителей ЭЭ

Предположим, что любой элемент СЭС может являться линейным ИИ напряжений, вызывающий отклонение или несимметрию напряжений. Тогда к основным ИИ несимметрии напряжений отнесем несимметричную нагрузку потребителей ЭЭ и несимметричное напряжение ИП СЭС. К основным ИИ отклонения напряжений: электрическую нагрузку потребителей ЭЭ в том случае, когда она превышает проектную или договорную величину; ЛЭП в том случае, когда ее пропускная способность не соответствует передаваемой мощности; силовым трансформатор в случае неудовлетворительного регулирования им напряжения; ИП в случае несоблюдения им режима работы СЭС по напряжению.

Рассмотрим способы выделения неискажающих и искажающих частей элементов СЭС по несимметрии и отклонению напряжений, а так же их представления в схемах замещения. Исходными данными для этой задачи будем считать измеряемые в СЭС токи, напряжения и фазовые соотношения между ними, паспортные данные элементов ЭС, ограничения по разрешенной потребляемой мощности потребителей ЭЭ, положения устройств регулирования напряжения силовых трансформаторов, а также уровни напряжений ИП по условиям режимов работы СЭС.

Потребитель ЭЭ. Одним из основных способов представления электрической нагрузки потребителей ЭЭ является ее задание в виде сопротивлений или проводимостей. По результатам измерений токов и напряжений установившегося режима работы сети эти параметры могут быть определены следующим образом:

$$\underline{Z}_{\Phi\Pi i} = \underline{U}_{\Phi\Pi i} / \underline{I}_{\Phi\Pi i} \text{ или } \underline{Y}_{\Phi\Pi i} = (\underline{U}_{\Phi\Pi i} / \underline{I}_{\Phi\Pi i})^{-1}, \quad (2)$$

где $\underline{U}_{\Phi\Pi i}$ - фазное напряжение на шинах i -го потребителя ЭЭ;

$\underline{I}_{\Phi\Pi i}$ - фазный ток нагрузки i -го потребителя ЭЭ.

Для выделения неискажающей части электрической нагрузки потребителя ЭЭ по несимметрии напряжений воспользуемся его некоторым симметричным состоянием, например:

$$\underline{Z}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}} = (\underline{Z}_{A\Pi i} + \underline{Z}_{B\Pi i} + \underline{Z}_{C\Pi i}) / 3 \text{ или } \underline{Y}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}} = (\underline{Y}_{A\Pi i} + \underline{Y}_{B\Pi i} + \underline{Y}_{C\Pi i}) / 3, \quad (3)$$

тогда искажающие части будут определяться следующим образом:

$$\begin{cases} \underline{Z}_{A\Pi i}^{\text{иск}} = \underline{Z}_{A\Pi i} - \underline{Z}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}}; \\ \underline{Z}_{B\Pi i}^{\text{иск}} = \underline{Z}_{B\Pi i} - \underline{Z}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}}; \\ \underline{Z}_{C\Pi i}^{\text{иск}} = \underline{Z}_{C\Pi i} - \underline{Z}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}}; \end{cases} \text{ или } \begin{cases} \underline{Y}_{A\Pi i}^{\text{иск}} = \underline{Y}_{A\Pi i} - \underline{Y}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}}; \\ \underline{Y}_{B\Pi i}^{\text{иск}} = \underline{Y}_{B\Pi i} - \underline{Y}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}}; \\ \underline{Y}_{C\Pi i}^{\text{иск}} = \underline{Y}_{C\Pi i} - \underline{Y}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}}. \end{cases} \quad (4)$$

При определении искажающей части электрической нагрузки потребителя ЭЭ по отклонению напряжения будем отталкиваться от превышения им потребляемой мощности ($\Delta S_{\Phi\Pi i}$) относительно проектной или договорной величины ($S_{\Phi\Pi i}^{\text{max}}$):

$$\underline{Z}_{\Phi\Pi i} = \frac{S_{\Phi\Pi i}^{\text{max}}}{I_{\Phi\Pi i}^2} + \frac{\Delta S_{\Phi\Pi i}}{I_{\Phi\Pi i}^2} = \underline{Z}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}} + \underline{Z}_{\Phi\Pi i}^{\text{иск}} \text{ или } \underline{Y}_{\Phi\Pi i} = \frac{(S_{\Phi\Pi i}^{\text{max}})^*}{U_{\Phi\Pi i}^2} + \frac{\Delta S_{\Phi\Pi i}^*}{U_{\Phi\Pi i}^2} = \underline{Y}_{\Phi\Pi i}^{\text{неиск}} + \underline{Y}_{\Phi\Pi i}^{\text{иск}}. \quad (5)$$

Из выше полученных выражений следует, что потребитель ЭЭ, как ИИ по несимметрии и отклонению напряжений, в схеме замещения СЭС может быть представлен в виде последовательного или параллельного соединения соответствующих неискажающих и искажающих частей сопротивлений или проводимостей (рис. 2).

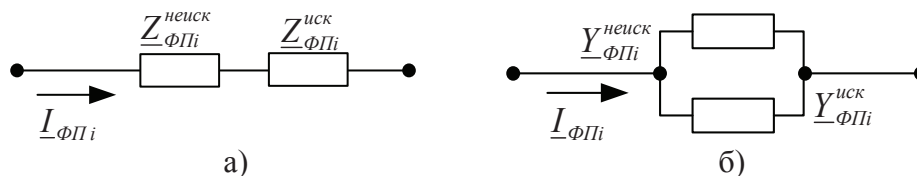


Рис. 2. Схема замещения потребителя ЭЭ, представленная в виде:
а) сопротивлений; б) проводимостей

Силовой трансформатор. В рамках задачи распределения ФВ в искажение напряжений будем считать силовой трансформатор симметричным элементом, который не может выступать существенным ИИ несимметрии напряжений в СЭС. Также силовой трансформатор не будем рассматривать как ИИ по отклонению напряжения в случае не соответствия его номинальной мощности нагрузке потребителей ЭЭ. Это обусловлено тем, что, во-первых, по условиям выбора и проверки номинальной мощности силовых трансформаторов допускается их как длительная аварийная, так и систематическая перегрузки [6]. Во-вторых, длительное превышение допустимой перегрузочной способности силовых трансформаторов приводит к их быстрому термическому износу [6], а такие режимы работы силовых трансформаторов в СЭС исключаются. Несмотря на это, силовой трансформатор может быть ИИ по отклонению напряжения, если он как регулятор напряжения ЭС не выполняет своих функций.

Рассмотрим общий случай силового двухобмоточного трансформатора с устройством регулирования напряжения, принцип работы которого основан на изменении количества витков его первичной (ВН) обмотки. Пренебрегая потерями в стали, схема замещения трансформатора может быть представлена активным R_T и реактивным X_T сопротивлениями обмоток (рис. 3), значения которых обычно приводятся к стороне ВН.

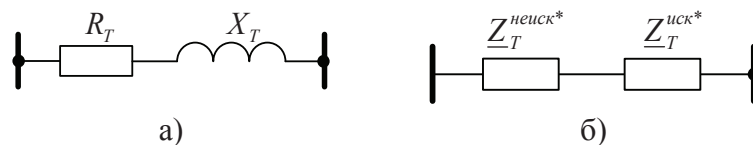


Рис. 3 Схема замещения трансформатора:

а) приведенная к стороне ВН; б) приведенная к стороне НН с выделенной неискажающей и искажающей частями

Приведение сопротивления силового трансформатора \underline{Z}_T к напряжению его вторичной (НН) обмотки производится через квадрат коэффициента трансформации трансформатора (K_T) следующим образом:

$$\underline{Z}_T^* = \underline{Z}_T / K_T^2. \quad (6)$$

Коэффициент трансформации с учетом положения устройства регулирования напряжения определяется так:

$$K_T = \frac{U_{ном}^{ВН} \cdot (1 + n_{отв} \cdot \Delta U_{рег}^*)}{U_{ном}^{НН}}, \quad (7)$$

где $U_{ном}^{ВН}$ и $U_{ном}^{НН}$ – номинальные напряжения обмоток ВН и НН силового трансформатора;

$n_{отв}$ – номер положения устройства регулирования напряжения;

$\Delta U_{рег}^*$ – шаг регулирования напряжения в о.е.

В процессе регулирования напряжения изменяется K_T . Если производится неудовлетворительное регулирование напряжения, то K_T не достигает требуемого значения. Исходя из этого, представим K_T в виде суммы неискажающей $K_T^{неиск}$ и искажающей $K_T^{иск}$ частей:

$$K_T = K_T^{неиск} + K_T^{иск}. \quad (8)$$

С учетом последнего выражения запишем \underline{Z}_T^* в следующем виде:

$$\underline{Z}_T^* = \frac{\underline{Z}_T}{(K_T^{неиск})^2} \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot K_T^{иск} / K_T^{неиск} + (K_T^{иск})^2 / (K_T^{неиск})^2}. \quad (9)$$

В случае $K_T^{иск} / K_T^{неиск} \ll 1$, что соответствует реальным условиям эксплуатации ЭС, сопротивление силового трансформатора \underline{Z}_T^* приближенно может быть записано следующим образом:

$$\underline{Z}_T^* \approx \frac{\underline{Z}_T}{(K_T^{неиск})^2} - \underline{Z}_T \cdot \left[2 \frac{K_T^{иск}}{K_T^{неиск}} + \frac{(K_T^{иск})^2}{(K_T^{неиск})^2} \right]. \quad (10)$$

Определяя первое слагаемое выражения (10) как неискажающую часть ($\underline{Z}_T^{неиск*} \approx \underline{Z}_T / (K_T^{неиск})^2$), а второе – как искажающую часть $\underline{Z}_T^{иск*} = -\underline{Z}_T \cdot \left[2K_T^{иск} / K_T^{неиск} - (K_T^{иск})^2 / (K_T^{неиск})^2 \right]$, схема замещения силового трансформатора будет иметь вид, приведенный на рис. 3б.

Следует отметить, что силовой трансформатор как ИИ по отклонению напряжения следует рассматривать только в рамках его возможной регулировочной способности. Если по условию регулирования напряжения недостаточно его диапазона регулирования, то следует определять другую причину отклонения напряжения на шинах НН силового трансформатора. Например, недостаточный уровень напряжения со стороны ВН силового трансформатора вследствие большого падения напряжения в ЭС или неудовлетворительного уровня напряжения на шинах ИП (рис. 1).

Линия электропередачи. ЛЭП, как и силовой трансформатор, будем считать симметричным элементом. По отклонению напряжения ЛЭП будет являться ИИ только в том случае, если ее сечение не соответствует передаваемой мощности по условию выбора и проверки сечений по допустимой потере напряжения. Это характерно для ЭС среднего и низкого класса напряжений, в которых увеличение нагрузок потребителей ЭЭ не сопровождается соответствующей реконструкцией ЭС.

Ограничимся ЛЭП номинальным напряжением $U_{ном} \leq 35$ кВ. Тогда поперечными параметрами можно пренебречь [7] и схема замещения ЛЭП будет иметь вид, аналогичный схеме замещения потребителя ЭЭ (рис. 2). Для определения искажающей части необходимо найти разность параметров схемы замещения ЛЭП для текущего $\underline{Z}_{\phiЛЭП}^{F1}$ и необходимого $\underline{Z}_{\phiЛЭП}^{F2}$ сечений:

$$\underline{Z}_{\phiЛЭП}^{иск} = \underline{Z}_{\phiЛЭП}^{F1} - \underline{Z}_{\phiЛЭП}^{F2} \quad \text{или} \quad \underline{Y}_{\phiЛЭП}^{иск} = \underline{Y}_{\phiЛЭП}^{F1} - \underline{Y}_{\phiЛЭП}^{F2}. \quad (11)$$

Отметим, что наибольший искажающий эффект ЛЭП по отклонению напряжения при несоответствии ее сечения передаваемой мощности будет наблюдаться в распределительных ЭС (рис. 4) напряжением до 20 кВ.

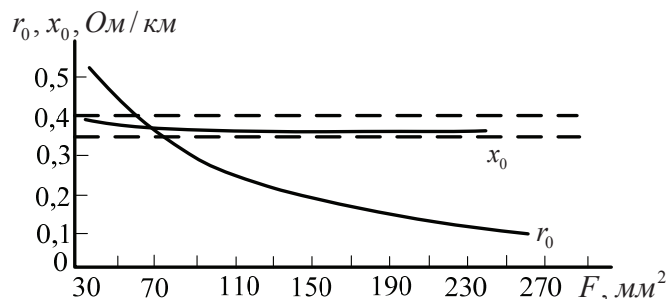


Рис. 4. Зависимость удельных сопротивлений воздушных линий от сечения [7]

Источник питания. ИП СЭС приближенно можно считать независимым от электрической нагрузки потребителей ЭЭ. Это допущение позволяет рассматривать ИП как источник бесконечной мощности и представлять его в схеме замещения постоянной ЭДС (рис. 5, а), равной фактическому напряжению на его шинах.

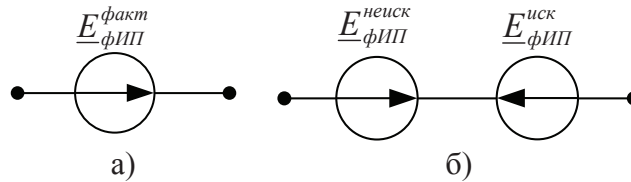


Рис. 5. Схема замещения ИП:

а) без выделения искажающей части; б) с выделением искажающей части

Для выделения неискажающей части ИП по несимметрии напряжений воспользуемся его следующим симметричным состоянием:

$$\underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}} = (\underline{E}_{\text{АИП}} + \underline{E}_{\text{ВИП}} + \underline{E}_{\text{СИП}}) / 3, \quad (12)$$

тогда искажающая часть ИП будут определяться так:

$$\begin{cases} \underline{E}_{\text{АИП}}^{\text{иск}} = \underline{E}_{\text{АИП}} - \underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}}; \\ \underline{E}_{\text{ВИП}}^{\text{иск}} = \underline{E}_{\text{ВИП}} - \underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}}; \\ \underline{E}_{\text{СИП}}^{\text{иск}} = \underline{E}_{\text{СИП}} - \underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}}. \end{cases} \quad (13)$$

В основу выделение искажающей части ИП по отклонению напряжения положим тот факт, что на его шинах должно поддерживаться постоянное напряжение, значение которого определяется режимом работы СЭС. Отклонение фактического напряжения на шинах ИП ($\underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{факт}}$) от требуемого или неискажающего ($\underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}}$) и будет характеризовать искажающую часть ИП по отклонению напряжения:

$$\underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{иск}} = \underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}} - \underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{факт}}. \quad (14)$$

Из последнего выражения следует, что в схему замещения ИП следует вводить в виде двух последовательно соединенных ЭДС: $\underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{неиск}}$ и $\underline{E}_{\text{фИП}}^{\text{иск}}$ (рис. 5б). С учетом вышеизложенного схема замещения СЭС и ее потребителей ЭЭ (рис. 1) в пространстве фазных составляющих с отдельно выделенными неискажающими и искажающими частями линейных ИИ будет иметь вид, представленный на рис. 6.

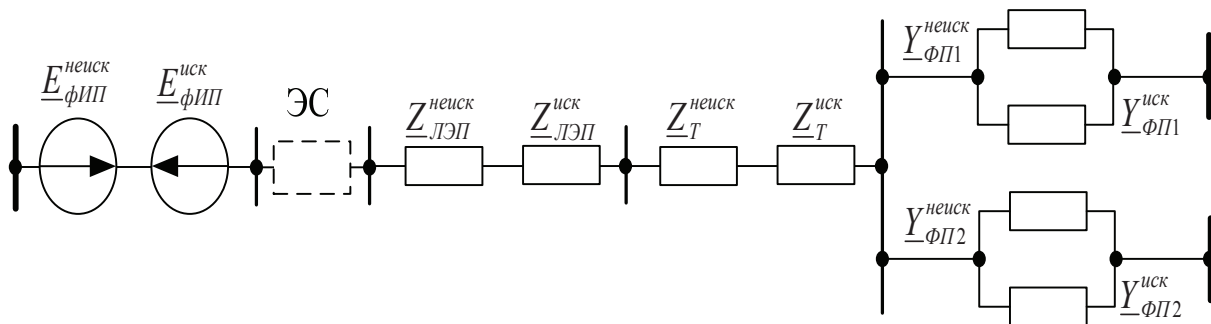


Рис. 6. Схема замещения СЭС и ее потребителей ЭЭ

Выводы

Предложены схемы замещения линейных ИИ напряжений СЭС в пространстве фазных составляющих с отдельно выделенными в них искажающими и неискажающими частями. Разработаны выражения для определения неискажающих и искажающих частей линейных ИИ напряжений СЭС. Полученные результаты исследования могут быть использованы в математических моделях решения задачи распределения ФВ линейных ИИ напряжений СЭС в искажение напряжений в ТОП.

Список использованной литературы:

1. Чэпмэн, Д. Цена низкого качества электроэнергии [Текст] / Д. Чэпмэн // Энергосбережение. – 2004. – №1. – С. 66–69.
2. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст] / Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. Саенко, Ю. Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений [Текст] / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. – 2015. – № 9. – С. 123–133.
4. Y. Sayenko. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages / Y. Sayenko, D. Kalyuzhnyi // IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'. – 2015. P. 84–88.
5. Саенко, Ю. Л. Принцип исключения в математической модели распределения фактических вкладов линейных источников искажений в искажения напряжений в точке общего присоединения [Текст] / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Вип. 167. “Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України”. - Харків: ХНТУСГ. – 2015. – С. 31–33.
6. ГОСТ 14209-97 (МЭК 354-91). Межгосударственный стандарт. Руководство по нагрузке силовых масляных трансформаторов [Текст]. – Введ. 2002-01-01. М. : Изд-во стандартов, 2002. – 81 с.
7. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети [Текст] / В. И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

Reference:

1. Chepmen D. Tsena nizkogo kachestva elektroenergii [Price low power quality] Energoberehenie – Energy Saving, 2004, No.1, P. 66–69.
2. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu. L. Kachestvo elektroenergii na promushlennukh predpriatiakh [Power quality in industrial plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2005. 261 p.
3. Saenko, Yu. L., Kalyuzhnyi, D. N. Analiz metodov opredeleniya fakticheskikh vkladov v ponizhenie kachestva elektricheskoy energii po nesimmetrii i nesinusoidalnosti. [The analysis of methods for determining the factual contribution to lowering the power quality through asymmetry and non-sinusoidal voltage]. Elektrifikatsiya transporta - Electrification of transport. – 2015. No 9. P. 123–133.
4. Y. Sayenko. Analytical methods for determination of the factual contributions impact of the objects connected to power system on the distortion of symmetry and sinusoidal waveform of voltages / Y. Sayenko, D. Kalyuzhnyi // IX Miedzynarodowe sympozjum Kompatybilnosc elektromagnetyczna w elektrotechnice i elektronice EMC'. – 2015. P. 84–88.
5. Saenko, Yu. L., Kalyuzhnyi, D. N. Printsip isklyucheniya v matematicheskoy modeli raspredeleniya fakticheskikh vkladov lineynykh istochnikov iskazheniy v iskazheniya napryazheniy v tochke obschego prisoedineniya [Exclusion principle in mathematical model of distribution of the factual contribution of the linear source of distortion in voltage distortion at the point of common coupling]. Visnyk Kharkivskoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. Vyp. 167. “Problemy enerhozabezpechennya ta enerhozberezhennya v APK Ukrainy” - Journal of Kharkov National Technical University of Agriculture Petro Vasilenko. Vol. 167. "The problems of energy supply and energy efficiency in agriculture of Ukraine". Kharkiv: Kharkov: KNTUA. – 2015. P. 31–33.
6. GOST 14209-97 (MEK 354-91). Mezghosudarstvennyiy standart. Rukovodstvo po nagruzke silovykh maslyanykh transformatorov [Interstate standard. Manual load power oil transformers]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2002. 81 p.
7. Idelchik V. I. Elektricheskie sistemy i seti. [Electric systems and networks.]. – Moscow, «Energoatomizdat» Publ., 1989. 592 p.

Поступила в редакцию 10.10 2015 г.