

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.004.163

© Жежеленко І.В.¹, Нестерович В.В.²

ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ВЫЗВАННЫХ СНИЖЕНИЕМ ЕЕ КАЧЕСТВА

Выполнен сравнительный анализ известных методик расчетов дополнительных потерь электрической энергии, вызванных снижением ее качества. Показано, что известные методики оценки дополнительных потерь электрической энергии предполагают использование большого объема исходной информации о параметрах электрооборудования и режиму электрической сети, что делает неоправданно сложным и трудоемким их применение в значительном числе случаев. На основе проведенного анализа разработана классификация и определены возможные области применения этих методик, сформулированы предъявляемые к ним требования.

Ключевые слова: качество электрической энергии, потери электрической энергии, искажения форм кривых напряжения и тока, высшая гармоника, спектральный состав тока, трансформатор.

Жежеленко І.В., Нестерович В.В. Оцінка втрат електричної енергії, що викликані зниженням її якості. Виконано порівняльний аналіз відомих методик розрахунків додаткових втрат електричної енергії, що викликані зниженням її якості. Показано, що відомі методики оцінки додаткових втрат електричної енергії передбачають використання великого обсягу вихідної інформації про параметри електрообладнання та режиму електричної мережі, що робить невиправдано складним і трудомістким їх застосування в значній кількості випадків. На основі проведенного аналізу розроблено класифікацію та визначено можливі сфери застосування цих методик, сформульовані вимоги до них.

Ключові слова: якість електричної енергії, втрати електричної енергії, спотворення форм кривих напруги та струму, вища гармоніка, спектральний склад струму, трансформатор.

I.V. Zhezhelenko, V.V. Nesterovych. Evaluation of power losses due to reduced power quality. A comparative analysis of the known methods of calculating additional power losses caused by a decrease in its quality has been performed. It has been shown that the known methods of estimating additional power losses assume the use of a large amount of initial information as to the parameters of electrical equipment and the electric network regime, which makes their application unnecessarily complex and time-consuming in a significant number of cases. Based on the analysis, a classification has been developed and possible areas of applying these methods have been defined, and the requirements for them have been formulated. Using the example of determining the additional power losses caused by distortion of the shapes of the current and voltage curves, it has been shown that the known techniques assume the use of data on the values of higher harmonics of currents in individual branches of the electric network as the initial information. It is suggested, in the future, to consider the possibility of using as the initial data of this calculation the values of the higher harmonics of the voltages at the network

¹ д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь, kafedra.epp.pstu@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь, Nesterovych_v_v@pstu.edu

nodes, which will simplify the calculation. At the same time, the resulting underestimation of losses can be eliminated by introducing correction factors that take into account the increase in the currents of higher harmonics in individual branches.

Keywords: *power quality, power losses, voltage and current waveform distortion, higher harmonic, spectral composition of the current, transformer.*

Постановка проблеми. В настоящее время рядом отечественных и международных стандартов установлены нормативные значения показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Отклонение величин ПКЭ от нормативных значений может приводить к возникновению отрицательных последствий:

- аварий в системах передачи и распределения электрической энергии (ЭЭ);
- ложных срабатываний устройств релейной защиты и автоматики;
- ускоренного старения электрической изоляции и преждевременного выхода из строя электроэнергетического оборудования;
- снижения производительности технологического оборудования;
- увеличения потерь ЭЭ.

Для обоснования принимаемых нормативных значений ПКЭ в разное время делались попытки оценки экономического ущерба, вызванного снижением качества ЭЭ. Методики оценки такого ущерба необходимы также для обоснованного выбора средств нормализации качества ЭЭ. В рамках данной работы будут рассмотрены методики оценки одной из составляющей ущерба – дополнительных потерь ЭЭ, возникающих за счет снижения ее качества.

Анализ последних исследований и публикаций. Вопросу оценки дополнительных потерь ЭЭ, вызванных снижением ее качества, посвящено значительное число публикаций [1-21]. Среди них можно выделить публикации, посвященные оценке потерь в элементах электрических сетей: воздушных и кабельных линиях [1-8], силовых трансформаторах [1-3, 5, 6, 9-19], батареях конденсаторов [10], фильтро-компенсирующих устройствах [10], асинхронных и синхронных двигателях [2, 9, 10, 20]. С другой стороны, можно выделить публикации, рассматривающие влияние отдельных ПКЭ на величину потерь ЭЭ: искажений формы кривых напряжений и токов [1-5, 7-22], несимметрии токов и напряжений [1, 5, 6, 10, 20, 22], колебаний [10] и отклонений напряжения [5, 10, 20].

Анализ имеющихся публикаций, посвященных данному вопросу, показал, что в большинстве случаев рассматривается оценка потерь ЭЭ в отдельных элементах электрических сетей [1-3, 9-11, 13, 20]. Известен также ряд исследований, в которых приводятся оценки потерь ЭЭ в целом для системы электроснабжения предприятия или электрической сети электроснабжающей организации [1, 3, 9, 13]. Как правило, в этом случае применяются математические модели и методики расчета, разработанные для оценок величин потерь в отдельных элементах, что приводит к необоснованно громоздким расчетам. Работы, в которых рассматривались бы упрощенные методики оценки данных потерь применительно к сложным электрическим сетям, отсутствуют. Отсутствует также обоснование применимости известных методик оценки дополнительных потерь ЭЭ для конкретных категорий электрических сетей.

Целью данной работы является разработка классификации методик расчета дополнительных потерь ЭЭ, вызванных снижением ее качества, определение возможных областей применения этих методик и формулирование предъявляемых к ним требований.

Изложение основного материала. Описанные в литературе методики и результаты оценки дополнительных потерь ЭЭ во многих случаях носят частный характер и имеют ограниченные сферы применения. Для того чтобы оценить возможность их использования в тех или иных случаях необходимо предварительно рассмотреть классификацию этих методик.

Оценка потерь ЭЭ может выполняться на различных уровнях:

- применительно к отдельному элементу электрической сети (трансформатор, воздушная или кабельная линия и т. п.) или электроприемнику (асинхронный или синхронный двигатель и др.);
- для системы электроснабжения какого-либо объекта (предприятия) или определенного класса объектов;
- для электрической сети определенного уровня напряжения (или определенной топологии) энергоснабжающего предприятия;
- для энергохозяйства страны в целом (или же определенной отрасли).

В этих случаях возможны различные подходы к оценке дополнительных потерь ЭЭ:

1) разработка методик расчета потерь ЭЭ с учетом максимально полной исходной информации (сведения о параметрах оборудования, режимах электрической сети, значениях ПКЭ) для получения оценок дополнительных потерь с максимальной точностью;

2) разработка приближенных (инженерных) методик оценки дополнительных потерь ЭЭ;

3) приближенная оценка дополнительных потерь ЭЭ для определенных классов электрических сетей или систем электроснабжения;

4) приближенная оценка дополнительных потерь ЭЭ для отдельных отраслей промышленности, транспорта или энергохозяйства страны в целом.

Выбор того или иного подхода к оценке дополнительных потерь ЭЭ определяется решаемой задачей. Методики оценки дополнительных потерь [1-3, 5, 9, 13], основанные на расчете потерь в каждом из элементов электрической сети (или системы электроснабжения), имеют ограниченную область применения:

- проведение научных исследований,
- проверка адекватности разрабатываемых инженерных методик расчета,
- проверочные расчеты для определенных типовых схем,
- расчеты, выполняемые при проектировании элементов электрической сети или электроприемников.

Это связано с тем, что их использование требует большого объема исходной информации как в отношении параметров элементов сети, так и режима ее работы (величины токов во всех ветвях сети, значения ПКЭ в узлах и т. п.). На стадии проектирования электрических сетей и систем электроснабжения необходимая исходная информация часто отсутствует или имеется в недостаточном объеме, а в процессе эксплуатации электрических сетей использование этих методик возможно только при наличии автоматизированных систем контроля соответствующих параметров режима. При неполноте исходной информации использование данных методик не оправдано, т. к. приводит к увеличению сложности расчетов (или соответствующих математических моделей) без обеспечения повышенной точности.

Инженерные методики оценки дополнительных потерь ЭЭ, вызванных снижением ее качества, должны обеспечивать получения результата с приемлемой погрешностью при минимизированном объеме исходной информации. Основные задачи, решаемые с помощью данных методик:

- оценка дополнительных потерь, как одной из составляющих ущерба от снижения качества ЭЭ, при выполнении технико-экономического сравнения вариантов и обоснования принимаемых решений с целью нормализации ПКЭ на стадии проектирования;

- оценка необходимости принятия дополнительных технических решений по нормализации ПКЭ в процессе эксплуатации систем электроснабжения отдельных предприятий или электрических сетей энергоснабжающих организаций.

Оценки дополнительных потерь ЭЭ, выполняемые для определенных классов электрических сетей, требуются для решения следующих задач:

- оценки границ, при выходе за которые дополнительные потери ЭЭ возрастают до значений, требующих их учета, или разработки мероприятий по их снижению;

- обоснование экономической эффективности мероприятий по нормализации КЭ для типовых схем.

Оценка дополнительных потерь ЭЭ для отдельных отраслей промышленности, транспорта или энергохозяйства страны в целом может использоваться для обоснования принимаемых нормативных документов в области качества электроэнергии и оценки возможной эффективности мероприятий по приведению ПКЭ в соответствие с нормами.

К недостаткам большинства методик определения дополнительных потерь ЭЭ, вызванных отклонением ПКЭ от нормативных значений, следует также отнести то, что их авторы не приводят анализ возможных погрешностей и не оговаривают области их применения.

Для правильного выбора методик оценки дополнительных потерь ЭЭ, вызванных снижением ее качества, в каждой из указанных областей применения следует предварительно сформулировать требования к необходимой точности расчетов. Очевидно, что максимальная точность требуется (и может быть достигнута) для методик первой группы. В зависимости от решаемой задачи относительная погрешность определения дополнительных потерь ЭЭ в этом

случае может лежать в пределах 5...15%. Для методик 2-4 групп допустимо большее значение относительной погрешности – до 20...25%.

Оценка дополнительных потерь с использованием методик первой группы применительно к системе электроснабжения предприятия или электрической сети электроснабжающей организации требует использования большого количества информации о параметрах соответствующего оборудования и режиме электрической сети. В связи с этим представляется целесообразным при разработке инженерных методик второй группы упростить решаемую задачу путем ограничения числа элементов, потери в которых необходимо оценивать, числа учитываемых параметров режима и ПКЭ. Анализ структуры потерь ЭЭ (например, [23]) в системах электроснабжения городов и промышленных предприятий показывает, что в большинстве случаев преобладающими будут потери ЭЭ в трансформаторах (нагрузочные и на холостой ход) и линиях (нагрузочные). Во многих случаях также должны учитываться потери в электроприемниках.

Возможность ограничения числа учитываемых параметров режима рассмотрим на примере определения дополнительных потерь ЭЭ в трансформаторах, вызванных искажениями кривых токов и напряжений.

Дополнительные потери ЭЭ в элементах электрической сети, обусловленные искажением форм кривых токов и напряжений, в первую очередь связаны с протеканием по этим элементам несинусоидальных токов, содержащих наряду с составляющей промышленной частоты (50 или 60 Гц) высокочастотные составляющие с частотами высших гармоник (ВГ). При увеличении частоты тока проявляется действие нескольких связанных друг с другом эффектов [1, 24]: поверхностного эффекта, эффекта близости соседних проводников и воздействия на параметры цепи окружающих металлических масс (корпуса, экрана, брони и т. п.). Воздействие этих эффектов на значения потерь ЭЭ может быть учтено увеличением активного сопротивления элемента сети на частоте ВГ по сравнению с сопротивлением элемента для постоянного тока или активным сопротивлением на промышленной частоте. В зависимости от вида элемента (воздушная или кабельная линия, шинопровод, трансформатор и т. п.) влияние того или иного из перечисленных эффектов будет различным и зависеть от расстояния между токоведущими частями и их формой.

Потери активной ЭЭ в трансформаторах можно разделить на магнитные и нагрузочные. Магнитные потери складываются из гистерезисных потерь и потерь от вихревых токов. Нагрузочные потери представляют собой сумму потерь в меди обмоток (основных и дополнительных из-за поверхностного эффекта и вихревых токов в проводе) и дополнительных потерь в стенках бака и других металлических частях, вызываемых потоком рассеяния.

Дополнительные потери активной мощности в трансформаторах вызываются как искажением форм кривых токов, протекающих по обмоткам трансформаторов, так и искажением форм кривых напряжений, приложенных к этим обмоткам [1, 5]. В общем случае эти потери включают составляющие, обусловленные изменением магнитных потерь и потерь рассеяния, а также увеличением потерь в меди.

В работах [1, 5] предлагается определять суммарные потери в трансформаторах при искажении форм кривых токов и напряжений как

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{м}} \left(\frac{I_L}{I_1} \right)^2 + \Delta P_{\text{в.т.}(1)} \left(\sum_{n=1}^N \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^2 \right) + \left(\Delta P_{\text{р}(1)} + \Delta P_{\text{д.в.т.}(1)} \right) \left(\sum_{n=1}^N \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 n^{0,8} \right), \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{тр}}$ – суммарные потери активной мощности в трансформаторе, Вт; $\Delta P_{\text{м}}$ – общие потери активной мощности в меди (при синусоидальном токе), Вт; I_L – действующее значение тока в обмотках трансформатора, отн. ед.; I_1 – действующее значение первой гармоники тока в обмотках трансформатора, отн. ед.; $\Delta P_{\text{в.т.}(1)}$ – потери активной мощности из-за вихревых токов при полной нагрузке трансформатора и синусоидальном токе и напряжении промышленной частоты, Вт; I_n – действующее значение n -й гармоники тока в обмотках трансформатора, отн. ед.; $\Delta P_{\text{р}(1)}$ – потери рассеяния в конструктивных частях при полной нагрузке трансформатора

и синусоидальном токе и напряжении промышленной частоты, Вт; $\Delta P_{д.в.т.(1)}$ – дополнительные потери активной мощности из-за вихревых токов при полной загрузке трансформатора и синусоидальном токе и напряжении промышленной частоты, Вт.

Анализ выражения (1) показывает, что оно не учитывает изменение магнитных потерь, вызванное искажением формы кривой напряжения. Это может быть оправданным в большинстве случаев (при условии, что ПКЭ соответствуют требованиям действующих стандартов).

Применение выражения (1) предполагает использование большого объема информации о параметрах трансформатора и параметрах режима (величинах токов отдельных ВГ).

В работе [1] предложено упрощенно оценивать увеличенные суммарные потери в трансформаторах при искажении форм кривых токов и напряжений как

$$\Delta P_{тр} = 3KI_1^2 R, \quad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий повышенную загрузку трансформатора, вызванную токами ВГ; R – активное сопротивление трансформатора, Ом.

Коэффициент K в странах Европы принято оценивать как

$$K = \sqrt{1 + \frac{c}{1+c} \left(\frac{I_1}{I}\right)^2 \sum_{n=2}^N n^q \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}, \quad (3)$$

где c – отношение потерь активной мощности из-за вихревых токов при протекании тока основной частоты к потерям, вызванным протеканием постоянного тока, равного по величине действующему значению переменного тока; I – действующее значение переменного тока, протекающего по обмоткам трансформатора, с учетом ВГ, А; q – константа, которая зависит от конструкции от обмоток трансформатора и частоты тока.

По мнению авторов работы [1], использование выражения (2) позволяет упростить методику определения потерь ЭЭ в трансформаторах.

В работе [11] для оценки дополнительных потерь активной мощности в трансформаторах на частотах ВГ предлагается использовать выражение

$$\Delta P_{тр.иск} = 3 \sum_{n=2}^N I_n^2 R k_{нт}, \quad (4)$$

где $k_{нт}$ – коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления трансформатора на частоте n -й гармоники тока вследствие поверхностного эффекта (для силовых трансформаторов можно принять: $k_{5Т} = 2,1$, $k_{7Т} = 2,5$, $k_{11Т} = 3,2$ и $k_{13Т} = 3,7$).

Расчет с применением выражения (4) представляется наиболее простым, однако также требует учета спектрального состава тока, протекающего через трансформатор.

В случае сложной электрической сети, включающей ряд трансформаторов, воздушных и кабельных линий, применение выражений (1)-(4) и аналогичным им требует предварительного определения спектров всех токов, протекающих через трансформаторы и линии, что значительно усложняет задачу.

Из этого вытекает необходимость определения минимального объема исходной информации, которая позволяет с допустимой погрешностью оценить возникающие потери ЭЭ, и разработки соответствующих упрощенных методик оценки.

Предварительный анализ показывает, что в большинстве ветвей электрической сети величины ВГ токов в значительной мере определяются величинами ВГ напряжений узлов. Исключением из этого будут только ветви, с которыми непосредственно связаны нелинейные нагрузки. В связи с этим представляется целесообразными разработка методик определения дополнительных потерь ЭЭ, основанных на использовании данных о ВГ напряжений в узлах сети, а не ВГ токов в ветвях, что значительно упростит их применение. При этом возникающее за-

нижение потерь может быть устранено введением поправочных коэффициентов, учитывающих увеличение токов ВГ в отдельных ветвях. Значения этих коэффициентов должны быть получены предварительно для типовых схем электроснабжения и типовых электрических нагрузок.

Выводы

1. Показано, что известные методики оценки дополнительных потерь ЭЭ, вызванных отклонением значений ПКЭ от нормальных, предполагают использование большого объема исходной информации о параметрах электрооборудования и режима электрической сети, что делает неоправданно сложным и трудоемким их применение в значительном числе случаев.
2. На основе проведенного анализа разработана классификация методик расчета дополнительных потерь ЭЭ, вызванных снижением ее качества, определены возможные области применения этих методик и сформулированы предъявляемые к ним требования.
3. Представляется целесообразными разработка методик определения дополнительных потерь ЭЭ, основанных на использовании данных о ВГ напряжений в узлах сети, а не ВГ токов в ветвях, что значительно упростит их применение.
4. Задачей дальнейших исследований является разработка упрощенных инженерных методик определения дополнительных потерь ЭЭ для приближенной оценки дополнительных потерь ЭЭ для определенных классов электрических сетей или систем электроснабжения, а также отдельных отраслей промышленности, транспорта или энергохозяйства страны в целом.

Список использованных источников:

1. Estimation and classification of power losses due to reduced power quality / T. Bantras [et al.] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting (22-26 July 2012, San Diego, California). – IEEE, 2012. – P. 1-6.
2. Yazdani-Asrami M. Harmonic Study for MDF industries: a case study / M. Yazdani-Asrami, S.M.B. Sadati, E. Samadaei // 2011 IEEE Applied Power Electronics Colloquium (18-19 April 2011, Johor Bharu, Malaysia). – IEEE, 2011. – P. 149-154.
3. Analysis of losses in cables and transformers under power quality related issues / F.L. Tofoli [et al.] // Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (22-26 Feb. 2004). – IEEE: 2004. – Vol. 3. – P. 1521-1526.
4. Modelling and sensitivity analysis of the thermal behaviour of LV-cables for different current conditions / J.J. Desmet [et al.] // 2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. – IEEE, 2004. – P. 471-476.
5. Cobben J.F.G. Increasing energy efficiency by improving power quality / J.F.G. Cobben, V. Cuk, W.L. Kling // 15 WSEAS International Conference on Systems: Proceedings (14-16 July 2011, Corfu, Greece). – Wisconsin : WSEAS Press, 2011. – P. 298-301.
6. Bina M.T. Three-phase unbalance of distribution systems: complementary analysis and experimental case study / M.T. Bina, A. Kashefi // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2011. – Vol. 33. – №. 4. – P. 817-826.
7. Bhattacharyya S. Power quality requirements and responsibilities at the point of connection: Ph.D. dissertation / S. Bhattacharyya. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2011. – 268 p.
8. Hagh M.T. Investigation of harmonic current source effects on distribution and transmission lines capacity and losses: case study / M.T. Hagh, A.R. Milani, M.R. Azimizadeh // International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE). – 2011. – Iss. 8. – Vol. 3. – № 3. – P. 81-85.
9. An analysis of costs related to the loss of power quality / F.C. Pereira [et al.] // 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Proceedings (14-16 Oct. 1998). – IEEE, 1998. – Vol. 2. – P. 777-782.
10. Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость потребителей : монография / И.В. Жежеленко [и др.]. – М. : Машиностроение, 2012. – 349 с.
11. Derating of transformers under non-sinusoidal loads / S.M.B. Sadati [et al.] // 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (22-24 May 2008). – IEEE, 2008. – P. 263-268.
12. Evaluation of distribution transformer losses and remaining life considering network harmonic, based on analytical and simulation methods / S.M.B. Sadati [et al.] // Australian Journal of Basic

- and Applied Sciences. – 2010. – Vol. 4. – № 10. – P. 5291-5299.
13. Key T.S. Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office building / T.S. Key, J.-S. Lai // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1996. – Vol. 32. – № 5. – P. 1017-1025.
 14. The effects of harmonic components on transformer losses of sinusoidal source supplying non-linear loads / I. Daut [et al.] // *American Journal of Applied Sciences*. – 2006. – Vol. 3. – № 12. – P. 2131-2133.
 15. Biricik S. A method for power losses evaluation in single phase transformers under linear and non-linear load conditions / S. Biricik, Ö.C. Özerdem // *Przeglad Elektrotechniczny (Journal of Electrical Review)*. – 2011. – Vol. 87. – № 12a. – P. 74-77.
 16. Biricik S. Experimental study and comparative analysis of transformer harmonic behaviour under linear and nonlinear load conditions / S. Biricik, Ö.C. Özerdem // *10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (8-11 May 2011)*. – IEEE, 2011. – P. 1-4.
 17. Kefalas T.D. Harmonic impact on distribution transformer no-load loss / T.D. Kefalas, A.G. Kladas // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2010. – Vol. 57. – № 1. – P. 193-200.
 18. Analysis based on improved method for transformer harmonic losses / C. Pan [et al.] // *Energy Procedia*. – 2012. – Vol. 16. – P. 1845-1851.
 19. Said D.M. Analysis of distribution transformer losses and life expectancy using measured harmonic data / D.M. Said, K.M. Nor, M.S. Majid // *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (26-29 Sept. 2010, Bergamo)*. – IEEE, 2010. – P. 1-6.
 20. Power quality impact on performance and associated costs of three-phase induction motors / O.C.N. Souto [et al.] // *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power: Proceedings (14-16 Oct. 1998)*. – IEEE, 1998. – Vol. 2. – P. 791-797.
 21. Analysis of K-rated transformer to make it suitable to handle the harmonics generated by solid state devices on the load side / M.K. Verma [et al.] // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. – 2014. – Vol. 4. – Iss. 9. – P. 508-514.
 22. Evaluation of distribution system losses due to load unbalance / L.F. Ochoa [et al.] // *15th Power Systems Computation Conference (22-26 Aug 2005, Liège)*. – 2005. – P. 1-4.
 23. Толшаков А.В. Анализ потерь в сетях электроснабжающих организаций Удмуртской республики и пути их снижения. Нормирование технологических потерь электрической энергии / А.В. Толшаков // *Промышленная энергетика*. – 2012. – № 8. – С. 2-5.
 24. Жежеленко И.В. Амплитудно-частотные характеристики электрических сетей / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – Мариуполь : ПГТУ, 1998. – 99 с.

References:

1. Bantras T., Čuk V., Cobben J.F.G., Kling W.L. Estimation and classification of power losses due to reduced power quality. *Abstracts of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2012, pp. 1-6. (Eng.)
2. Yazdani-Asrami M., Sadati S.M.B., Samadaei E. Harmonic study for MDF industries: a case study. *Abstracts of IEEE Applied Power Electronics Colloquium*, 2011, pp. 149-154. (Eng.)
3. Tofoli F.L., Morais A.S., Gallo C.A., Sanhueza S.M.R., De Oliveira A. Analysis of losses in cables and transformers under power quality related issues. *Abstracts of 19th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2004, vol. 3, pp. 1521-1526. (Eng.)
4. Desmet J.J., Putman D.J., Vanalme G.M., Belmans R.J. Modelling and sensitivity analysis of the thermal behaviour of LV-cables for different current conditions. *Abstracts of 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2004, pp. 471-476. (Eng.)
5. Cobben J.F.G., Čuk V., Kling W.L. Increasing energy efficiency by improving power quality. *Abstracts of 15th WSEAS International Conference on Systems*, 2011, pp. 298-301. (Eng.)
6. Bina M.T., Kashefi A. Three-phase unbalance of distribution systems: Complementary analysis and experimental case study. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2011, vol. 33, no. 4, pp. 817-826. (Eng.)
7. Bhattacharyya S. Power quality requirements and responsibilities at the point of connection. Ph. D. diss. Eindhoven, 2011. 268 p. (Eng.)
8. Hagh M.T., Milani A.R., Azimizadeh M.R. Investigation of harmonic current source effects on distribution and transmission lines capacity and losses: case study. *International Journal on Tech-*

- nical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 2011, iss. 8, vol. 3, no. 3, pp. 81-85. (Eng.)
9. Pereira F.C., Souto O.C.N., De Oliveira J.C., Vilaca A.L.A., Ribeiro P.F. An analysis of costs related to the loss of power quality. *Abstracts of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 1998, vol. 2, pp. 777-782. (Eng.)
 10. Zhezhelenko I.V., Shidlovskii A.K., Pivniak G.G., Saenko Iu.L., Noiberger N.A. *Elektromagnitnaia sovmestimost' potrebitelei* [Electromagnetic compatibility of consumers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2012. 349 p. (Rus.)
 11. Sadati S.M.B., Tahani A., Jafari M., Dargahi M. Derating of transformers under non-sinusoidal loads. *Abstracts of 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2008, pp. 263-268. (Eng.)
 12. Sadati S.M.B., Motevali B.D., Dargahi M., Yazdani-Asrami M. Evaluation of distribution transformer losses and remaining life considering network harmonic, based on analytical and simulation methods. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2010, vol. 4, no. 10, pp. 5291-5299. (Eng.)
 13. Key T.S., Lai J.-S. Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office building. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, vol. 32, no. 5, pp. 1017-1025. (Eng.)
 14. Daut I., Syafruddin H.S., Ali R., Samila M., Haziah H. The effects of harmonic components on transformer losses of sinusoidal source supplying non-linear loads. *American Journal of Applied Sciences*, 2006, vol. 3, no. 12, pp. 2131-2133. (Eng.)
 15. Biricik S., Özerdem Ö.C. A method for power losses evaluation in single phase transformers under linear and nonlinear load conditions. *Przegląd Elektrotechniczny – Journal of Electrical Review*, 2011, vol. 87, no. 12a, pp. 74-77. (Eng.)
 16. Biricik S., Özerdem Ö.C. Experimental study and comparative analysis of transformer harmonic behaviour under linear and nonlinear load conditions. *Abstracts of 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2011, pp. 1-4. (Eng.)
 17. Kefalas T.D., Kladas A.G. Harmonic impact on distribution transformer no-load loss. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, vol. 57, no. 1, pp. 193-200. (Eng.)
 18. Pan C., Kong L., Zhenxin L., Zheng Q., Wang Z. Analysis based on improved method for transformer harmonic losses. *Energy Procedia*, 2012, vol. 16, pp. 1845-1851. (Eng.)
 19. Said D.M., Nor K.M., Majid M.S. Analysis of distribution transformer losses and life expectancy using measured harmonic data. *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2010, pp. 1-6. (Eng.)
 20. Souto O.C.N., De Oliveira J.C., Neto L.M., Ribeiro P.F. Power quality impact on performance and associated costs of three-phase induction motors. *Abstracts of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 1998, vol. 2, pp. 791-797. (Eng.)
 21. Verma M. K., Kaushik R., Prabhakar P., Sengupta M. K. Analysis of K-rated transformer to make it suitable to handle the harmonics generated by solid state devices on the load side. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, vol. 4, iss. 9, pp. 508-514. (Eng.)
 22. Ochoa L.F., Ciric R.M., Padilha-Feltrin A., Harrison G.P. Evaluation of distribution system losses due to load unbalance. *Abstracts of 15th Power Systems Computation Conference*, 2005, pp. 1-4. (Eng.)
 23. Tolshakov A.V. Analiz poter' v setiakh elektrosnabzhaiushchikh organizatsii Udmurtskoi respubliki i puti ikh snizheniia. Normirovanie tekhnologicheskikh poter' elektricheskoi energii [Analysis of losses in the networks of power supply organizations of the Udmurt Republic and ways to reduce them. Normalization of technological losses of electrical energy]. *Promyshlennaiia energetika – Industrial power engineering*, 2012, no. 8, pp. 2-5. (Rus.)
 24. Zhezhelenko I.V., Saenko Iu.L. *Amplitudno-chastotnye kharakteristiki elektricheskikh setei* [Amplitude-frequency characteristics of electrical networks]. Mariupol, PSTU Publ., 1998. 99 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Роянов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.03.2017