

Расчет потерь электроэнергии в условиях вероятностного характера исходной нагрузки

С. Н. Шелюг

ФГБОУ ВО "Уральский федеральный университет
имени первого президента России Б.Н. Ельцина"

E-mail: s.n.shelyug@urfu.ru

Я. В. Шитикова

ФГБОУ ВО "Уральский федеральный университет
имени первого президента России Б.Н. Ельцина"

E-mail: honey.shitikova@mail.ru

Аннотация. Важным фактором, влияющим на повышение энергетической эффективности распределения электрической энергии, является оценка величины потерь электроэнергии. Наблюдающийся в последние годы значительный рост числа нелинейных и несимметричных нагрузок приводит к нарушению симметрии и синусоидальности протекающих в линиях электропередачи токов. Исследования показывают, что указанные факторы могут приводить к заметному увеличению нагрузочных потерь электроэнергии. В рамках настоящей работы проведены исследования влияния искажения синусоидальности формы кривых протекающих токов на величину потерь электроэнергии в фидере 0,4 кВ на интервале времени 1 сутки. Были проанализированы результаты, полученные при использовании традиционного метода расчета и метода, учитывающего несинусоидальность. Произведено сравнение результатов расчета с результатами измерений. Обоснована необходимость использования предложенного метода расчета потерь электроэнергии.

Ключевые слова: потери электрической энергии; нелинейные параметры; несинусоидальность; мгновенная несимметрия; поверхностный эффект

Известно, что основными факторами, влияющим на величину потерь электроэнергии в проводах линии электропередачи, является величина протекающего электрического тока, а также симметричность загрузки фаз трехфазной системы, эффект близости и поверхностный эффект [1, 2].

Для расчета нагрузочных потерь электроэнергии используются несколько методов, которые базируются на законе Джоуля–Ленца. Их отличия обусловлены исходной информацией, которой располагают при проведении расчетов. Но наиболее широкое распространение получил метод средних нагрузок:

$$\Delta W = k_k \cdot \Delta P_{cp} \cdot T \cdot k_\phi^2, \quad (1)$$

Коэффициент формы графика определяется по формуле:

$$k_\phi^2 = \frac{1 + 2 \cdot k_3}{3 \cdot k_3}, \quad (2)$$

Исследования [4], [5] и [6] показывают, что потери электроэнергии зависят от несимметрии токов и параметров оборудования, что учет несимметрии нагрузки приводит к заметному увеличению нагрузочных потерь электроэнергии (до 30%) в линиях электропередачи. Наибольший вклад вносят дополнительные потери от токов нулевой последовательности [5].

В принятых на территории России методиках расчета нагрузочных потерь электроэнергии не используется информация о несинусоидальности токов линий электропередачи, обусловленной нелинейными нагрузками потребителей. Хорошо известно, что доля нелинейных потребителей постоянно растет и, как следствие, увеличивается искажение синусоидальности формы кривой протекающих токов и приложенных напряжений. При этом существуют исследования, которые показывают, что величина потерь мощности в проводах линии электропередачи зависит от формы кривой протекающего тока. В работе [7] отмечается, что потери активной мощности в элементах электроэнергетической сети при протекании по ним несинусоидального тока могут быть вычислены по следующему уравнению:

$$\Delta P = \sum_{n=1}^{40} (3 \cdot I_n^2 \cdot R \cdot \sqrt{n}) \quad (12)$$

Уравнение (12) справедливо при выполнении следующих допущений:

- трехфазная система токов симметрична;
- гармонический состав токов по фазам совпадает;
- ток в нулевом проводе отсутствует.

Потери активной мощности в элементах электроэнергетической сети при нарушении этих допущений могут быть вычислены по следующему уравнению:

$$\Delta P = I_{A0}^2 \cdot R_A + I_{B0}^2 \cdot R_B + I_{C0}^2 \cdot R_C + I_{N0}^2 \cdot R_N + \sum_{n=1}^N k_{Rn} \cdot (I_{An}^2 \cdot R_A + I_{Bn}^2 \cdot R_B + I_{Cn}^2 \cdot R_C + I_{Nn}^2 \cdot R_N), \quad (3)$$

В работе [13] предлагается учитывать влияние искажения синусоидальности формы кривой тока коэффициентом дополнительных потерь из-за токов высших гармоник $K_{доп}$:

$$K_{доп} = 1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{In})^2 \cdot A_n + 3 \cdot \frac{R_1^{изл}}{R_1} \cdot \sum_{\substack{n=6k-3 \\ n=3,9,15...}}^{40} (K_{In})^2 \cdot A_n, \quad (4)$$

В работе [6] несимметрию предлагается учитывать с помощью коэффициента K_ε :

$$K_\varepsilon = K_{2i}^2 + K_{0i}^2 \cdot \frac{R_0}{R_1}, \quad (5)$$

В ГОСТ Р МЭК 60287-1-1 [14] предлагается рассчитывать сопротивление переменного тока с учетом коэффициентов поверхностного эффекта, а так же коэффициента эффекта близости:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4}, \quad (6)$$

где y_s – коэффициент поверхностного эффекта.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 \cdot \left(0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s} \right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} + 0,27} \right), \quad (7)$$

где y_p – коэффициент эффекта близости.

Важно отметить, что все рассмотренные работы ориентированы на уточнение расчета потерь мощности в условиях несимметрии и несинусоидальности протекающих токов. При этом известно, что интервалы времени, на которых ток в линии неизменен по всем характеристикам, крайне редки. На рис. 1 представлен суточный замер токов фаз и нулевого провода кабеля АСБ 4*185 протяженностью 299 метров. У кабеля сечение фаз и нулевого провода совпадают. Удельное сопротивление фаз кабеля $r_0=0,164$ Ом/км. По кабелю осуществляется электроснабжение промышленного участка. Измерения осуществлялись с посекундным осреднением измеренных параметров.

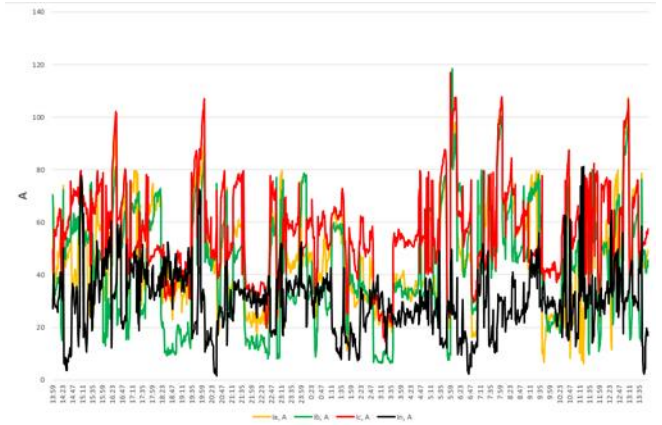


Рис. 1. Токи фаз и нулевого провода кабеля АСБ-4*185

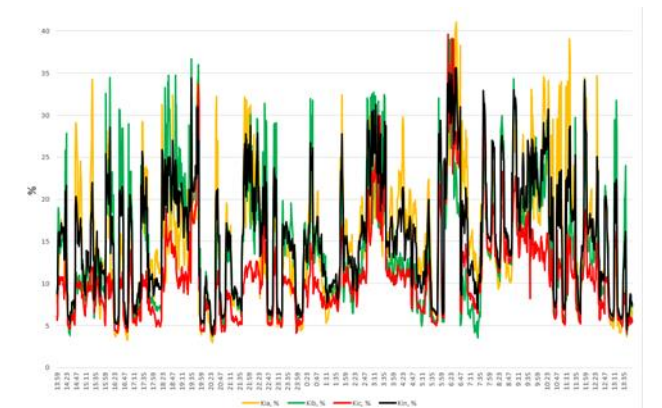


Рис. 2. Коэффициенты искажения синусоидальности токов фаз и нулевого провода кабеля АСБ-4*185

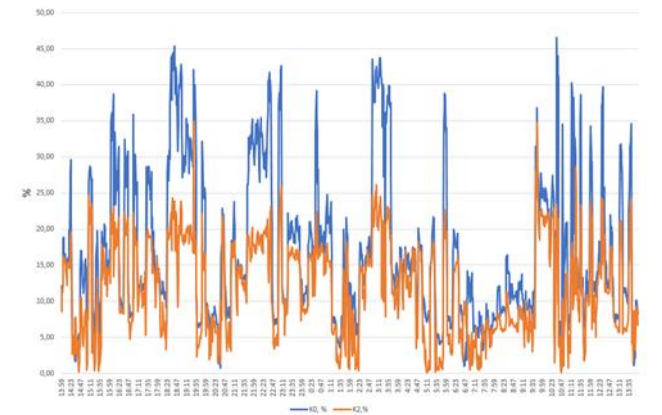


Рис. 3. Коэффициенты несимметрии токов по нулевой и обратной последовательности кабеля АСБ-4*185

Анализ представленной на рис. 1–3 информации позволяет сделать заключение о том, что для исследуемого кабеля графики коэффициента искажения синусоидальности токов фаз и нулевого провода и коэффициента несимметрии по нулевой и обратной последовательности имеют резко переменный характер.

По данным комплекса учета электроэнергии на базе счетчика МИЛУР-305, установленного в начале кабельного фидера, суточное потребление электроэнергии составило $W_{\text{сум}} = 46,736 \text{ тыс.кВт}\cdot\text{ч}$.

При суммировании потерь электроэнергии на всех гармониках получим расчетное уравнение для потерь электроэнергии:

$$\Delta W = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{\phi 1} \cdot k_k \cdot T \cdot \sum_{n=1}^{40} (k_{ln}^2 \cdot k_{\phi n}^2 \cdot k_{nssn}), \quad (8)$$

Произведя некоторые расчеты, для вычисления потерь мощности, можно записать уравнение для потерь электроэнергии:

$$\Delta W = \sum_{t=1}^T \Delta P_{et} \cdot \Delta t_t, \quad (9)$$

Сделаем допущение о том, что влияние поверхностного эффекта и эффекта близости на основной частоте отсутствует. С учетом этого и уравнения (1) перепишем уравнение:

$$\Delta W = k_k \cdot \Delta P_{ecc} \cdot T \cdot k_{le\phi}^2, \quad (10)$$

Для проверки теоретических выкладок были проведены расчеты потерь электроэнергии в указанном выше кабельном фидере на интервале времени 1 сутки (24 часа). Были выполнены следующие расчеты суточных потерь электроэнергии:

- Использовано уравнение (1)
- Использовано уравнение:

$$\Delta P = R_{\phi} \sum_{n=1}^N \left[I_{An}^2 \cdot (k_{AIn} + k_{ABn}) + I_{Bn}^2 \cdot (k_{AIn} + k_{ABn}) + I_{Cn}^2 \cdot (k_{AIn} + k_{ABn}) + I_{Nn}^2 \cdot (k_{AIn} + k_{ABn}) \right]. \quad (11)$$

Рассчитанные потери на каждом секундном интервале были просуммированы.

- Использовано уравнение (8) для различных интервалов времени: 10 минут, 1 час, 24 часа.
- Использовано уравнение (9). Рассчитанные потери на каждом интервале были просуммированы.
- Использовано уравнение (10) для различных интервалов времени: 10 минут, 1 час, 24 часа.

Во всех расчетах коэффициент влияния поверхностного эффекта определялся по уравнению (6), а коэффициент влияния эффекта близости – по уравнению (7).

Для оценки полученных расчетных результатов было проведено измерение потерь электроэнергии в анализируемом кабельном фидере. На конце фидера был установлен синхронизированный по времени со счетчиком в начале фидера счетчик МИЛУР-305.

Измерения количества электроэнергии на приемном конце кабеля счетчиком МИЛУР-305 дали результат $45\,911,35 \text{ тыс.кВт}\cdot\text{ч}$. Следовательно, фактические потери электроэнергии в фидере составили $0,83 \text{ тыс.кВт}\cdot\text{ч}$ или $1,78 \%$ от поступления электроэнергии на фидер.

ТАБЛИЦА 1 РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИЗМЕРЕНИЙ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В КАБЕЛЕ АСБ-4*185

Расчетное уравнение	Интервал осреднения параметров	Потери электроэнергии		Сравнение результатов расчета с расчетом по формуле (1)	
		тыс.кВт*ч	%	тыс.кВт*ч	%
1	1 сутки	0,683	1,46	0	0
36	1 секунда	0,802	1,72	0,119	17,37
33	10 минут	0,807	1,73	0,123	18,03
	1 час	0,811	1,73	0,127	18,62
	1 сутки	0,814	1,74	0,131	19,16
34	10 минут	0,801	1,71	0,118	17,25
	1 час	0,804	1,72	0,120	17,61
	1 сутки	0,808	1,73	0,124	18,19
35	10 минут	0,802	1,72	0,119	17,41
	1 час	0,803	1,72	0,119	17,42
	1 сутки	0,806	1,72	0,122	17,89
Измерения счетчиком	1 сутки	0,830	1,78	0,147	21,44

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- осреднение исходной информации на интервалах времени приводит к увеличению результата расчета потерь электроэнергии по сравнению с общепринятым расчетным уравнением (1);
- учет всех факторов (неравномерность графика нагрузки, несимметрия и несинусоидальность) приводит к заметному увеличению расчетных нагрузочных потерь электроэнергии в кабеле;
- измеренные фактические потери электроэнергии превышают расчетные потери. Причиной этого могут являться как погрешность счетчика, так и не учет потерь от токов утечки и токов в переходных сопротивлениях;
- результаты расчета потерь электроэнергии по формулам (8), (9) и (10) дают сравнимые результаты, при этом видно, что сложность расчета по указанным уравнениям несколько различается.

Выводы

- В работе показано, что учет несимметрии и несинусоидальности заметно изменяет расчетную величину нагрузочных потерь электроэнергии в кабеле по сравнению с общепринятым методом их расчета.
- Существует несколько методов расчета потерь мощности в условиях несимметрии и несинусоидальности протекающих токов. При этом методы расчета отечественных и зарубежных

специалистов базируются на одинаковой исходной информации, но методически различаются.

- В работе адаптированы различные методы расчета потерь мощности для расчета потерь электроэнергии.
- Учет дополнительных факторов приводит к увеличению расчетных нагрузочных потерь электроэнергии в кабеле на 17–19 % по отношению к общепринятому методу расчета.
- Результаты тестового расчета по различным методам показали, что результаты расчета потерь электроэнергии по формулам (8)–(10) дают результаты, отличающиеся не более чем на 5%.
- Необходимо провести дополнительные исследования в части влияния различных факторов на результаты расчета нагрузочных потерь электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A.N. Kulkarni and V.N. Bapat, "Energy loss due to harmonics in computers in IT offices." IEEEMA journal, Vol. XXVII, No. 2, February 2007.
- [2] Ranjana Singh, Amarjit Singh. Energy Loss Due to Harmonics in Residential Campus – A Case Study. UPEC2010, 31st Aug - 3rd Sept 2010.
- [3] Приказ Минэнерго России от 30 декабря 2008 г. № 326 «Об организации в министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям».
- [4] Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.
- [5] Коваленко П.В., Смышляева О.А. Анализ потерь мощности в электрических сетях при неравномерной и несимметричной нагрузке // Электрика. 2009. №9. С. 18–22.
- [6] Косоухов Ф.Д., Васильев Н.В., Филиппов А.О., Борошин А.Л., Горбунов А.О. Энергосбережение при транспортировке электрической энергии по линиям 0,38 кВ при несимметричной нагрузке // Электроэнергия. Передача и распределение, №5(44), сентябрь-октябрь, 2017. С. 64–71.
- [7] Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 4-е изд., перераб. И доп. М.: Энергоатомиздат. 2000. 331с. Ил.
- [8] Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий [Текст]: монография / И.В. Жежеленко [и др.]: под ред. И.В. Жежеленко. М.: Энергоатомиздат, 2007. 296 с.
- [9] Ollendorff F., Potentialfield der Electrotechnik, Berlin, 1932.
- [10] Марголин Н.Ф. Токи в земле. ГЭИ, 1947.
- [11] Люতারевич А.Г., Вырва А.А., Долингер С.Ю, Осипов Д.С., Четверик И.Н. Оценка дополнительных потерь мощности от высших гармоник в элементах систем электроснабжения // Омский научный вестник. 2009. № 1(77). С. 109–113.
- [12] Семичевский П.И. Методика расчета дополнительных потерь активных мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения промышленных предприятий, обусловленные высшими гармониками: автореф. дис.канд.техн.наук/ П.И.Семичевский. М., 1978. 206 с.
- [13] Симуткин М.Г. Разработка методов оценки влияния нелинейных электроприемников на режимы работы оборудования распределительных сетей: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. М., 2014. 163 с.
- [14] ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнение для расчета номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчет потерь. Общие положения.
- [15] IEEE Standard Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions (IEEE std. 1459TM. 2010). IEEE Power and Energy Society, New York, 2010.
- [16] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.