

Энергетика и электротехника

УДК 621.316.11

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ, ПИТАЮЩИХ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОМЫШЛЕННЫЕ УСТАНОВКИ

*К.С. Аверьянова, Н.В. Безменова, Н.Д. Голубева, М.В. Мякишев,
А.К. Танаев*

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Получены аналитические выражения для восстановления коэффициентов формы исходных случайных графиков электрической нагрузки, формируемых специальными промышленными установками, по известным значениям коэффициентов формы ступенчатых графиков электрической нагрузки, полученных осреднением исходных графиков на интервалах длительностью $t_{\text{эта}}$. Выражения учитывают не только информацию о случайном характере изменения ординат графиков электрической нагрузки, но и позволяют дать количественную оценку расчетным значениям технических потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях. Приведены погрешности между расчетными и реальными потерями электроэнергии, возникающие в результате потери информации о реальном случайном характере изменения ординат графиков электрической нагрузки, неравномерность которого на интервалах $t_{\text{эта}}$ оценивается исходным коэффициентом формы.

Ключевые слова: коэффициент формы, реальный и ступенчатый графики электрической нагрузки, потери электроэнергии.

Потери активной электроэнергии ΔW_a за расчетное время T_p при протекании тока $I(t)$, соответствующего исходному графику электрической нагрузки (ГЭН), на участке электрической сети с сопротивлением R определяются по [1]:

$$\Delta W_{a1} = 3I_{\text{э}}^2 RT_p = 3I_c^2 K_f^2 RT_p. \quad (1)$$

В (1) используются две важнейшие характеристики ГЭН: средняя I_c и эффективная $I_{\text{э}}$ электрические нагрузки, которые связаны между собой известным соотношением из [2]:

$$K_f = I_{\text{э}} / I_c, \quad (2)$$

характеризующим относительную неравномерность исходного $I(t)$ ГЭН во вре-

Ксения Сергеевна Аверьянова, студентка.

Надежда Валерьевна Безменова (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы».

Наталья Дмитриевна Голубева (к.ф.-м.н., доц.), доцент кафедры «Высшая математика и прикладная информатика».

Владимир Михайлович Мякишев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Теоретические основы электротехники».

Алексей Кимович Танаев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Теоретические основы электротехники».

мени через коэффициент формы K_f графика.

На практике, как правило, расчет ΔW_a производится по ступенчатому $I_\theta(t)$ ГЭН, полученному осреднением исходного $I(t)$ графика на M последовательных интервалах осреднения длительностью $\theta = T_p / M$:

$$\Delta W_{a2} = 3I_c^2 K_{f\theta}^2 RT_p, \quad (3)$$

а коэффициент формы $K_{f\theta}$ ступенчатого $I_\theta(t)$ ГЭН определяется по выражению [1]

$$K_{f\theta}^2 = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M I_{rc}^2 / I_c^2, \quad (4)$$

где I_c, I_{rc} – средние нагрузки за расчетное время T_p и на r -м интервале осреднения θ исходных $I(t)$ ГЭН соответственно.

Однако (4) не соответствует (2) – одному из важнейших соотношений в [2]. Кроме этого, (4) не имеет строгого теоретического обоснования, являясь эмпирической попыткой дать приближенную оценку $K_{f\theta}$ ступенчатого $I_\theta(t)$ ГЭН. Это объясняется тем, что в результате применения операции θ -осреднения к исходному $I(t)$ графику для преобразования его в ступенчатый $I_\theta(t)$ происходит потеря информации о реальном характере изменения ординат исходного $I(t)$ ГЭН, относительная неравномерность во времени которого оценивает K_f . Поэтому всегда реальные потери ΔW_{a1} электроэнергии по (1) будут больше расчетных потерь ΔW_{a2} электроэнергии по (3) на относительную величину [3]

$$\delta(\Delta W_a) = \frac{\Delta W_{a1} - \Delta W_{a2}}{\Delta W_{a1}} 100 = \left(1 - \frac{K_{f\theta}^2}{K_f^2}\right) 100, \% \quad (5)$$

Цель работы заключается в воспроизведении K_f исходных случайных процессов $I(t)$ изменения ординат ГЭН, формируемых специальными промышленными установками, по известным $K_{f\theta}$ ступенчатым $I_\theta(t)$ ГЭН. Воспроизведение K_f производится в рамках [2] с использованием метода вероятностного моделирования ГЭН [2], получившего дальнейшее развитие в [4].

Известно, что K_f , помимо (2), связан с вероятностными характеристиками исходного $I(t)$ ГЭН выражением [2]

$$K_f^2 = 1 + \frac{DI}{I_c^2}, \quad (6)$$

которое в силу статистической эквивалентности исходных $I(t)$ и ступенчатых $I_\theta(t)$ ГЭН справедливо и для $K_{f\theta}$ ступенчатых $I_\theta(t)$ ГЭН:

$$K_{f\theta}^2 = 1 + \frac{DI_\theta}{I_c^2}, \quad (7)$$

где DI и DI_θ – дисперсии ординат исходных $I(t)$ и ступенчатых $I_\theta(t)$ ГЭН соответственно. Дисперсия DI_θ ступенчатого $I_\theta(t)$ ГЭН определяется из [2]:

$$DI_\theta = \frac{2}{\theta^2} \int_0^\theta d\tau \int_0^\tau K(\tau) d\tau \quad (8)$$

и связывается с дисперсией DI исходного $I(t)$ ГЭН через корреляционную функцию (КФ) $K(\tau)$, определяющую не только взаимосвязь между ординатами исходного $I(t)$ ГЭН, но и изменение дисперсии DI_θ ступенчатых $I_\theta(t)$ ГЭН в зависимости от длительности интервала осреднения θ .

Для общепромышленных электроприемников (ЭП), ГЭН которых соответствует свойствам нормального, стационарного случайного процесса, а вероят-

ностная взаимосвязь между его ординатами описывается КФ вида

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|}, \quad (9)$$

в [2] дается следующее выражение, связывающее дисперсии DI исходных $I(t)$ и DI_0 ступенчатых $I_0(t)$ ГЭН:

$$DI_0 \frac{2DI}{m^2} [e^{-m} + m - 1], \quad (10)$$

где $\alpha = 1/T_k$ – коэффициент затухания вероятностной взаимосвязи, величина обратная постоянной времени корреляции T_k между ординатами реального $I(t)$ ГЭН; $m = \alpha\theta = \theta/T_k$ – относительное значение интервала осреднения θ в долях постоянной времени корреляции T_k между ординатами реального $I(t)$ ГЭН.

Выражение для оценки K_f после подстановки DI из (10) в (6) с учетом (7) окончательно примет вид [3]

$$K_f = \sqrt{\frac{m^2(K_{f\theta}^2 - 1)}{2[e^{-m} + m - 1]}}. \quad (11)$$

Тогда погрешность $\delta(\Delta W_a)$ в оценке расчетных потерь ΔW_{a2} электроэнергии по (5) с учетом (11) определяется по выражению [3]

$$\delta(\Delta W_a) = \left[(1 - K_{f\theta}^2) / \left(1 + \frac{(K_{f\theta}^2 - 1)m^2}{2[e^{-m} + m - 1]} \right) \right] \quad (12)$$

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, приведенные в [4], свидетельствуют, что ГЭН для большей части общепромышленных ЭП на различных уровнях иерархии систем электроснабжения [5] и специальных промышленных установок, таких как дуговые электросталеплавильные печи (ДСП), буровые установки для разбуривания нефтяных и газовых скважин, углесосные станции угольных шахт и др., представляют собой нормальный, стационарный случайный процесс с КФ вида

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|} \cos \omega_0 \tau, \quad (13)$$

в котором косинусоидальная составляющая КФ с частотой ω_0 обусловлена повторяемостью технологических операций. Выражение для K_f ГЭН с КФ вида (13) получается подстановкой дисперсии DI_0 ступенчатого $I_0(t)$ ГЭН, полученной в [4], в (6) и (7):

$$K_f = \sqrt{1 + \frac{m^2(K_{f\theta}^2 - 1)(1 + k_\omega^2)^2}{2[(1 - k_\omega^2)e^{-m} \cos k_\omega m - 2k_\omega e^{-m} \sin k_\omega m + m(1 + k_\omega^2) - 1 + k_\omega^2]}}}, \quad (14)$$

где $k_\omega = \omega_0 / \alpha$ – параметр случайного процесса изменения ординат ГЭН, характеризующий его спектральный состав.

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, проведенные в [4], свидетельствуют также, что математической моделью, описывающей вероятностную взаимосвязь между ординатами ГЭН ЭП портальных кранов речных и морских портов, а также ЭП предприятий строительной керамики, является нормальный, стационарный случайный процесс с КФ видов

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau - \frac{1}{k_\omega} \sin \omega_0 |\tau| \right); \quad (15)$$

$$K(\tau) = DIe^{-\alpha|\tau|} \left(\cos \omega_0 \tau + \frac{1}{k_\omega} \sin \omega_0 |\tau| \right) \quad (16)$$

соответственно.

Подстановка дисперсий DI_θ ступенчатых $I_\theta(t)$ ГЭН, полученных в [4], в (6) и (7) позволяет записать следующие выражения для K_f ГЭН с КФ видов (15) и (16):

$$K_f = \sqrt{1 + \frac{m^2 (K_{f\theta}^2 - 1) (1 + k_\omega^2)^2}{2 \left[1 - e^{-m} \cos k_\omega m - \frac{1}{k} e^{-m} \sin k_\omega m \right]}}; \quad (17)$$

$$K_f = \sqrt{1 + \frac{m^2 (K_{f\theta}^2 - 1) (1 + k_\omega^2)^2}{2 \left[(3 - k_\omega^2) e^{-m} \cos k_\omega m + \frac{(1 - 3k_\omega^2)}{k_\omega} e^{-m} \sin k_\omega m + 2m(1 + k_\omega^2) - 3 + k_\omega^2 \right]}}. \quad (18)$$

Результаты расчетов восстановленных значений K_f исходных $I(t)$ ГЭН по (11), (14), (17) и (18) приведены на рис. 1.

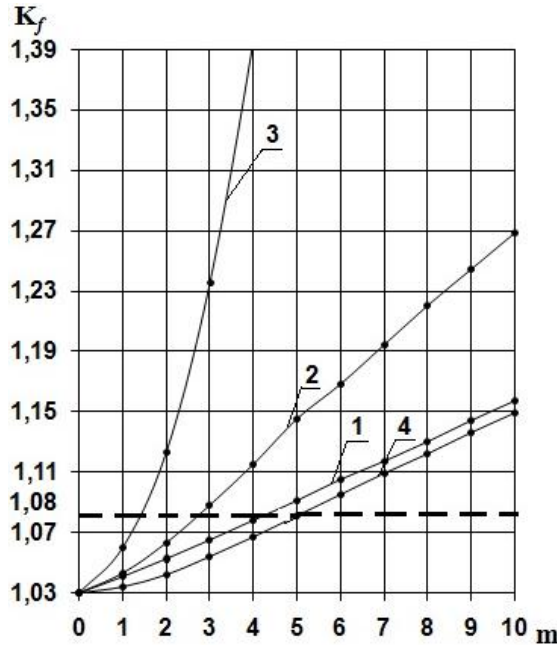


Рис. 1. Зависимости K_f от m при $K_{f\theta} = 1,03$ и $k_\omega = 1,0$:
 кривые 1, 2, 3, 4 – для КФ видов (9), (13), (15) и (16) соответственно;
 ----- – граница превышения $\delta K_f > 5\%$

Анализ кривых, приведенных на рис. 1, свидетельствует о разной степени влияния характеристик вероятностного процесса изменения ординат ГЭН на K_f исходных $I(t)$ графиков. Так, например, начиная с $m = 1,5$, $m = 3$, $m = 5$ и $m = 6$ для ГЭН с КФ видов (15), (13), (9) и (16) соответственно отличие δK_f коэффициента формы K_f исходного $I(t)$ графика от $K_{f\theta}$ ступенчатого $I_\theta(t)$ графика

$$\delta K_f = \left(1 - \frac{K_{f\theta}}{K_f} \right) 100, \% \quad (19)$$

превышает 5 %, достигая 10 %, 11 %, 18,8 % и 61 % при $m = 10$ для КФ видов (16), (9), (13) и (15) соответственно.

Погрешности $\delta(\Delta W_a)$ в оценке расчетных ΔW_{a2} потерь электроэнергии по (5) с учетом (14), (17) и (18) в относительных единицах получаются по выражениям:

$$\delta(\Delta W_a) = \left[\frac{(1 - K_{f\theta}^2)/(1 + m^2(1 + k_\omega^2)^2(K_{f\theta}^2 - 1))}{2[(1 - k_\omega^2)e^{-m} \cos k_\omega m - 2k_\omega e^{-m} \sin k_\omega m + m(1 + k_\omega^2) - 1 + k_\omega^2]} \right]; \quad (20)$$

$$\delta(\Delta W_a) = \left[\frac{(1 - K_{f\theta}^2)/(1 + \frac{m^2(K_{f\theta}^2 - 1)(1 + k_\omega^2)^2}{2[1 - e^{-m} \cos k_\omega m - \frac{1}{k_\omega} e^{-m} \sin k_\omega m]})}{2} \right]; \quad (21)$$

$$\delta(\Delta W_a) = \left[\frac{(1 - K_{f\theta}^2)/(1 + \frac{m^2(K_{f\theta}^2 - 1)(1 + k_\omega^2)^2}{2[(3 - k_\omega^2)e^{-m} \cos k_\omega m + \frac{(1 + 3k_\omega^2)}{k_\omega} e^{-m} \sin k_\omega m]})}{2} \right]. \quad (22)$$

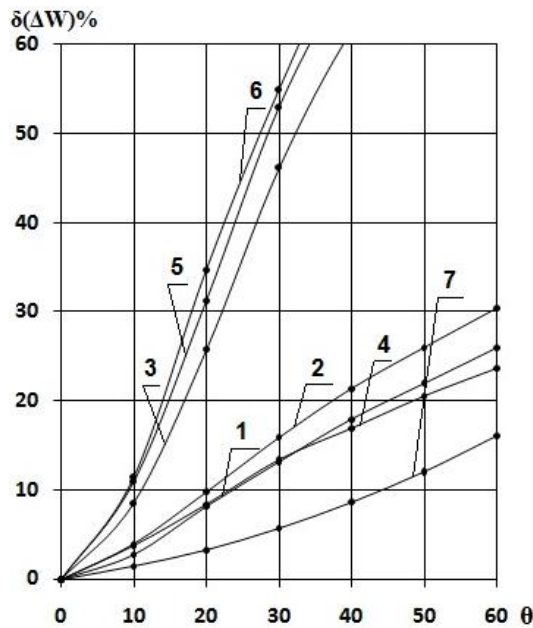


Рис. 2. Зависимость $\delta(\Delta W_a)$ от θ при $K_{f\theta} = 1,03$; $k_\omega = 1,0$; $T_k = 5$ мин: кривые 1, 2, 3, 4 – для КФ видов (9), (13), (15), (16) соответственно; кривые 5, 6 и 7 – для КФ вида (15) при $K_{f\theta} = 1,04$ ($k_\omega = 1,0$; $T_k = 5$ мин), при $K_{f\theta} = 1,03$ ($k_\omega = 1,5$; $T_k = 5$ мин), $K_{f\theta} = 1,03$ ($k_\omega = 1,0$; $T_k = 20$ мин) соответственно

Из (12), (20)÷(22) следует, что погрешность $\delta(\Delta W_a)$ в оценке расчетных ΔW_a потерь электроэнергии зависит не только от интервалов осреднения θ , корреляции T_k , и $K_{f\theta}$, но и от видов КФ и параметров k_ω случайного процесса изменения ординат исходных $I(t)$ ГЭН. По выражениям (12), (20)÷(22) построены графики, изображенные на рис. 2, иллюстрирующие количественную оценку влияния интервалов осреднения θ , корреляции T_k , $K_{f\theta}$ и видов, а также параметров k_ω случайного процесса изменения ординат исходных $I(t)$ ГЭН на погрешность $\delta(\Delta W_a)$

расчетных ΔW_a потерь электроэнергии.

Проиллюстрируем результаты расчета по восстановлению K_f исходного $I(t)$ ГЭН и оценке $\delta(\Delta W_a)$ расчетных потерь ΔW_{a2} электроэнергии на примере работы ДСП–20. Ступенчатый $I_\theta(t)$ график нагрузки ДСП–20 имеет длительность ступеньки $\theta=1$ мин и $K_{f\theta}=1,17$, а исходный $I(t)$ график нагрузки и его КФ характеризуются следующими параметрами, заимствованными из [4]: $\alpha = 0,015 \div 0,031 \text{ с}^{-1}$; $\omega_0 = 0,04 \div 0,07 \text{ с}^{-1}$; $k_\omega = 2,2 \div 2,7$. Время корреляции T_k для указанных диапазонов изменения параметров КФ для ГЭН с КФ вида (13) определяется по выражению [4]

$$T_k = \frac{1}{\alpha} - \frac{k^2}{\alpha^2(1+k^2)} + \frac{2k}{\alpha(1+k^2)} \frac{\exp(-\frac{\pi}{2k})}{\left[1 - \exp(-\frac{\pi}{k})\right]} \quad (23)$$

и находится в диапазоне $20 \div 40$ с. Тогда коэффициент формы K_f исходного $I(t)$ ГЭН ДСП–20, полученный по (14), находится в диапазоне $K_f = 1,43 \div 2,15$, а погрешность $\delta(\Delta W_a)$ в оценке расчетных ΔW_{a2} потерь электроэнергии – $33 \div 70$ % соответственно.

В [1] отмечается, что среднеквадратичная погрешность расчета $K_{f\theta}$ по ГЭН, полученным с помощью счетчиков электроэнергии, при максимальной погрешности счетчиков 3 % составляет 1 %. Как следует из расчетов по (12), (20)–(22), наряду с этой погрешностью необходимо учитывать погрешность, обусловленную неучетом неравномерности случайных ГЭН на интервалах осреднения θ .

Выводы:

1. Показано, что на погрешность $\delta(\Delta W_a)$ в оценке расчетных ΔW_{a2} потерь электроэнергии помимо $K_{f\theta}$, θ и T_k оказывают влияние вид КФ и параметр k_ω случайного процесса изменения ординат исходных $I(t)$ ГЭН.

2. Увеличение параметра k_ω случайного процесса изменения ординат исходных $I(t)$ ГЭН приводит к увеличению погрешности $\delta(\Delta W_a)$ в оценке расчетных ΔW_{a2} потерь электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: НЦ ЭНАС, 2006. – 280 с.
2. Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 182 с.
4. Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик графиков электрической нагрузки потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 257 с.
5. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: Учебник для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 670 с.

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2015 г.

ASSESSMENT OF RATED POWER LOSS IN SUPPLY MAINS OF INDUSTRIAL PLANTS

K.S. Averyanova, N.V. Bezmenova, N.D. Golubeva, V.M. Myakishev, A.K. Tanaev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

Analytical expressions for the recovery of the coefficients of the original random graphs electric load generated by special industrial installations, from the known values of the coefficients of the electrical load step graphs are obtained by averaging the original schedule at intervals of theta. Expressions take into account not only the information about the random nature of the changes ordinate schedules electrical load, but also allow to quantify the calculated values of technical losses of electricity in industrial electric networks. Shows errors between the estimated and actual losses of electricity resulting from the loss of information about the real nature of the random changes ordinate schedules electrical load is uneven at intervals estimated theta original form factor.

Keywords: a form ratio, initial and stepped load curves, power loss.

Kseniya S. Averyanova, Student.

Nadezhda V. Bezmenova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Nataliya D. Golubeva (Ph.D. (Phys. & Math.)), Associate Professor.

Vladimir M. Myakishev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Aleksey K. Tanaev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.