

Поступила в редакцию 17.09.2020
УДК 621.311.153.001.24

DOI 10.46960/2658-6754_2020_3_73

Д.Ю. Платонов, Н.Д. Голубева, В.П. Степанов

ПОГРЕШНОСТЬ В РАСЧЕТАХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПИТАЮЩИХ КРАНЫ РЕЧНЫХ ПОРТОВ

Самарский государственный технический университет
Самара, Россия

Приводится количественная оценка погрешности в определении технических потерь электроэнергии в системах электроснабжения речных портов. Учет случайных и резкопеременных изменений ординат исходных графиков электрической нагрузки кранов на ступенчатых графиках электрической нагрузки осуществляется за счет дополнительной информации: вида и параметров корреляционной функции индивидуальных графиков электрической нагрузки порталных кранов. Для восстановления коэффициентов формы, характеризующих неравномерность исходных графиков электрической нагрузки на ступеньках, используется метод вероятностного моделирования. Метод позволяет определить дополнительную неравномерность на ступеньках, вызванную резкопеременными изменениями ординат исходных графиков электрической нагрузки. Вид и параметры корреляционной функции исходных графиков электрической нагрузки кранов получены экспериментально в системах электроснабжения речных портов. Эксперименты охватывают погрузочные порталные краны грузоподъемностью от 1,5 до 30 т при работе с навалочными, штучными и лесными грузами. Показано, что при предельном диапазоне изменения коэффициента формы ступенчатого графика электрической нагрузки от 1,15 до 1,2, область восстановленных коэффициентов формы исходных графиков находится в границах: нижняя – от 1,21 до 1,28, а верхняя от 1,48 до 1,63. Дополнительное увеличение технических потерь электроэнергии находится в диапазоне от 10 до 46 %.

Ключевые слова: график электрической нагрузки, корреляционная функция графика, коэффициент колебательности, коэффициент формы, порталный кран, технические потери электрической энергии, ступенчатый график нагрузки.

I. Введение

Статья посвящена вопросу снижения потерь электроэнергии (ЭЭ) в системах электроснабжения (СЭС) речного порта за счет использования дополнительной информации о графиках электрической нагрузки (ГЭН). Необходимость таких исследований объясняется тем, что технические потери ЭЭ не могут быть измерены, а только рассчитаны.

Впервые уточнение технических потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях, питающих общепромышленные электроприемники, было приведено в [1], с вероятностной моделью графика электрической нагрузки в виде экспоненциальной корреляционной функции. В силу специфики производственной деятельности портов портальные краны обладают рядом особенностей по сравнению с общепромышленными электроприемниками. Их необходимо относить к специальным промышленным установкам, режим работы которых характеризуется резкопеременным ГЭН с коэффициентом формы $K_f > 1,1$ [2]. В СЭС речного порта краны являются не только основными потребителями ЭЭ, занимающими около 80 % от суммарной установленной мощности портового оборудования, а также являются наиболее мощными электроприемниками с номинальной мощностью от 30 до 200 кВт и напряжением питания 0,38 кВ [3].

Исследование влияния вида и параметров корреляционной функции, описывающей ГЭН портального крана, позволит усовершенствовать метод определения расчетных потерь электроэнергии в системах электроснабжения.

II. Предлагаемый подход

В условиях эксплуатации СЭС порта при отсутствии информационно-измерительных систем учета и контроля электроэнергии для оценки технических потерь активной электроэнергии используются ступенчатые ГЭН. Таким образом, причинами возникновения дополнительных технических потерь ЭЭ является подмена исходных ГЭН преобразованными, ступенчатыми ГЭН, а также пренебрежение на ступеньках преобразованного, ступенчатого ГЭН случайным и резкопеременным характером изменения ординат исходных графиков электрической нагрузки портальных кранов. Исследования, посвященные влиянию дополнительной информации на оценку технических потерь электроэнергии, проводились в [4-7]. Питание портальных кранов выполняется при помощи специальных электрических колонок и представляет собой отдельный участок сети, для которого необходимо производить отдельные расчеты потерь ЭЭ так же, как на участках с повышенными расчетными потерями ЭЭ [4].

Рассмотрим известное выражение о величине расчетных потерь активной электроэнергии:

$$\Delta W_{\text{ал}} = 3 \cdot I_s^2 \cdot R \cdot T_p = 3 \cdot I_c^2 \cdot K_f^2 \cdot R \cdot T_p, \quad (1)$$

где I_s – эффективная нагрузка; I_c – средняя нагрузка; R – активное сопротивление электрической сети; T_p – расчетное время, за которое определяются технические потери ЭЭ; K_f – коэффициент формы исходного ГЭН.

На практике, в первую очередь – ввиду простоты, обычно используют:

$$\Delta W_{al} = 3 \cdot I_c^2 \cdot K_{f\theta}^2 \cdot R \cdot T_p, \quad (2)$$

где $K_{f\theta}$ – коэффициента формы ступенчатого ГЭН.

Из теории электрических нагрузок известно, что коэффициент формы ступенчатого графика:

$$K_{f\theta}^2 = 1 + \frac{DI_\theta}{I_c^2}, \quad (3)$$

где DI_θ – дисперсия ступенчатого ГЭН

Для оценки технических потерь ЭЭ в электрических сетях целесообразно использовать выражение, сформулированное профессором Г.М. Каяловым [2], получаемое путем подстановки (3) в (2) и показывающее, что потери активной ЭЭ можно представить в виде двух составляющих:

$$\Delta W_{al} = \Delta W_c + \Delta W_{Dl\theta} = 3 \cdot I_c^2 \cdot R \cdot T_p + 3 \cdot DI_\theta \cdot R \cdot T_p, \quad (4)$$

где ΔW_c и $\Delta W_{Dl\theta}$ составляющие технических потерь ЭЭ, обусловленные средней и дисперсионной нагрузкой ступенчатого ГЭН.

Согласно общей теории нагрузок, коэффициент формы исходного ГЭН K_f , есть отношение эффективной нагрузки к средней:

$$K_f = \frac{I_s}{I_c}. \quad (5)$$

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

Выражения (3) и (6) статистически эквивалентны, их принципиальной разницей является отличие в дисперсиях исходного и ступенчатого графиков. Для оценки погрешности в определении технических потерь ЭЭ, уместно воспользоваться полученным в [8] вероятностной моделью ГЭН порталного крана, представленной в виде случайного стационарного марковского процесса с корреляционной функцией (КФ) вида [7]:

$$K(\tau) = DI \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cdot \left(\cos \omega\tau - \frac{1}{k_\omega} \cdot \sin \omega\tau_p \right). \quad (7)$$

где α – коэффициент затухания и ω – собственная частота колебания.

Согласно [8], для кранов при работе с навалочным грузом значения

коэффициента затухания α находятся в диапазоне от 0,023 до 0,028 с^{-1} , в то время как собственная частота колебаний ω принимает устойчивое значение 0,083 с^{-1} . Использование параметров α и ω позволяют воспользоваться впервые полученным коэффициентом колебательности k_ω для порталных кранов:

$$k_\omega = \frac{\omega}{\alpha}. \quad (8)$$

Результаты расчетов по (8) показывают, что коэффициент колебательности k_ω при работе порталных кранов с навалочным грузом, принимает достаточно устойчивое значение и изменяется в диапазоне от 3,2 до 3,6 [7].

Для определения погрешности требуется воспользоваться количественной оценкой вероятностной взаимосвязи между ординатами ГЭН, которым выступает промежуток времени, называемый временем корреляции T_k . Постоянная времени корреляции T_k определяется при помощи извлечения из-под интеграла корреляционной функции:

$$T_k = \int_0^\infty |k(\tau)| d\tau. \quad (9)$$

Подставив (6) в (8), получим аналитическое выражение для времени корреляции T_k , соответствующее корреляционной функции вида (7):

$$T_k = \frac{2 \cdot e^{-\frac{\pi}{k_\omega} \arccos \frac{k_\omega}{\sqrt{1+k_\omega^2}}}}{\alpha \cdot \sqrt{1+k_\omega^2} \cdot \left[1 - e^{-\frac{\pi}{k_\omega}} \right]}. \quad (10)$$

Результаты расчетов с использованием (10) показывают, что время корреляции T_k при работе с навалочными грузами находится в диапазоне от 38 до 78 минут. Из [7], [9] следует, что значения времени корреляции, согласно экспериментальным исследованиям находиться в диапазоне от 0,1 до 90 мин.

Для оценки неравномерности ступенчатого ГЭН $I_\theta(t)$ воспользуемся выражением [9]:

$$DI_\theta = \frac{2}{\theta^2} \cdot \int_0^\theta d\tau \int_0^\tau K(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Подставив (7) в (11) и раскрыв интегралы, получим дисперсию нагрузки порталного крана [10]:

$$DI_0 = \frac{2 \cdot DI}{m^2 \cdot (1 + k_\omega^2)} \cdot (1 - e^{-m} \cdot \cos(k_\omega \cdot m) - \frac{1}{k_\omega} \cdot e^{-m} \cdot \sin(k_\omega \cdot m)), \quad (12)$$

где $m = \alpha \cdot \theta = \theta / T_k$ – относительное значение длительности ступеньки θ , ступенчатого ГЭН $P_0(t)$ в долях постоянной времени корреляции T_k .

Особенностью (12) является связь между дисперсией ступенчатого и исходного ГЭН. Так, выполнив подстановку (12) в (3), получим аналитическое выражение для восстановленных K_f исходного ГЭН, представляющее научную новизну работы:

$$K_f = \sqrt{1 + \frac{m^2 \cdot (K_{f\theta}^2 - 1) \cdot (1 + k_\omega^2)}{2 \left[1 - e^{-m} \cdot \cos(k_\omega \cdot m) - \frac{1}{k_\omega} \cdot e^{-m} \cdot \sin(k_\omega \cdot m) \right]}}. \quad (13)$$

III. Результаты расчетов

Результаты расчетов по (13), для восстановленных K_f исходного ГЭН порталных кранов, грузоподъемностью от 1,5 до 30 т при работе с навалочным грузом представлены на рис 1.

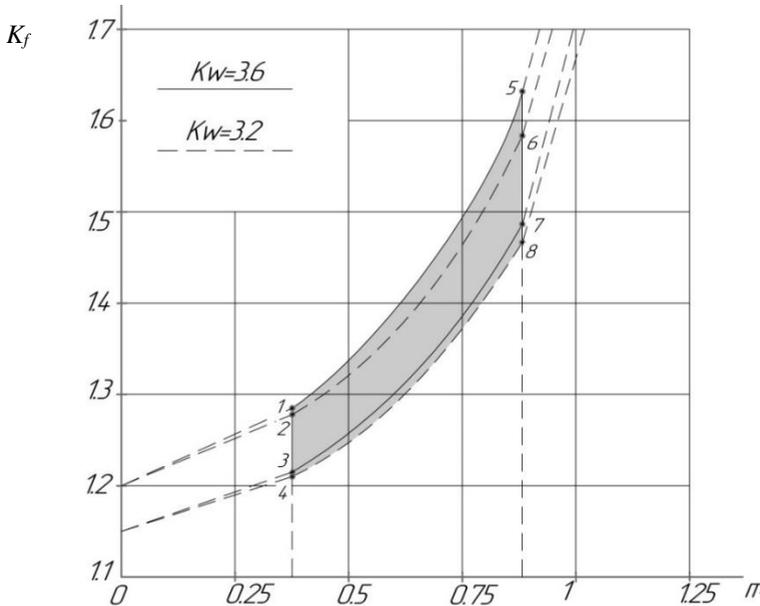


Рис. 1. Область изменения коэффициента формы исходного ГЭ m от параметра m и коэффициента формы ступенчатого ГЭН $K_{f\theta}$

Согласно рис. 1, учет вида и параметров КФ, приводит к увеличению коэффициенты формы исходного ГЭН K_f на величину $\delta K_f = 0,06 \div 0,31$ для нижней границы 4-8 и на величину $\delta K_f = 0,09 \div 0,43$ по [9]:

$$\delta K_{f\theta} = K_f - K_{f\theta} . \quad (14)$$

Из рис. 1 также следует, что при нагрузке $m = 0$ коэффициенты формы исходных K_f и ступенчатых $K_{f\theta}$ графиков, согласно правилу Лопиталя, равны между собой: $K_f = K_{f\theta} = 1,15$ и $K_f = K_{f\theta} = 1,2$.

Погрешность в оценке технических потерь энергии определяется:

$$\delta(\Delta W_{al}) = \frac{\Delta W_{Dl} - \Delta W_{Dl_0}}{\Delta W_{Dl}} = \frac{K_f^2 - K_{f\theta}^2}{K_f^2} . \quad (15)$$

Согласно (15), дисперсионная составляющая расчетных потерь электроэнергии ΔW_{Dl_0} по ступенчатым графикам всегда меньше дисперсионной составляющей ΔW_{Dl} по исходному графику согласно [6].

Результаты расчетов по (14) и (15) приведены на рис. 2 и показывают кривые изменения дополнительных технических потерь ЭЭ, по экспериментальным данным, полученным из рис. 1.

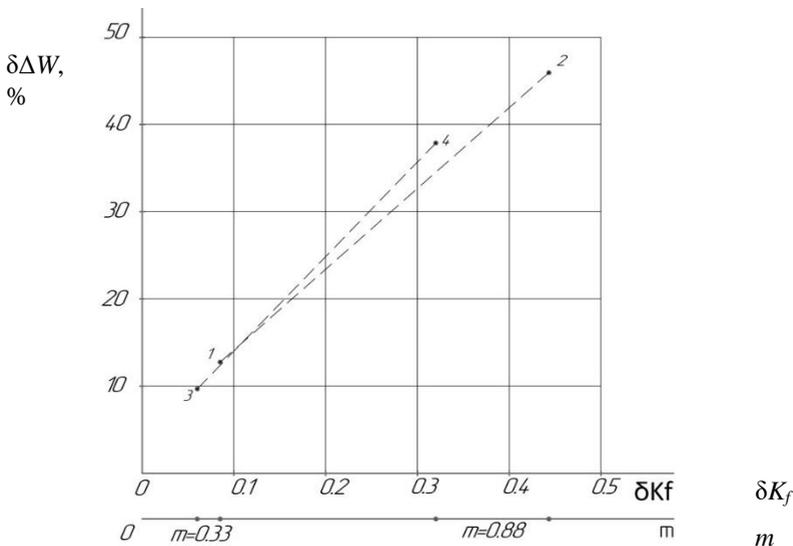


Рис. 2. Погрешность в определении технических потерь ЭЭ от увеличения коэффициента формы δK_f исходного графика

Кривая 1-2 соответствует верхней границе области, проиллюстрированной на рис. 1, а кривая 3-4 – нижней границе.

Из рис. 2 следует, что при отсутствии специальных приборов учета ЭЭ, а также длительности интервала осреднения $\theta = 30$ мин, погрешность в определении технических потерь для порталных кранов грузоподъемностью от 1.5 до 30 т находится в диапазоне от 10 до 46 % [11].

IV. Выводы

Причиной возникновения дополнительных технических потерь ЭЭ в СЭС речных портов является использование для порталных кранов ступенчатых ГЭН вместо исходных. Расчеты свидетельствуют, что учет случайных и резкопеременных изменений ординат исходных ГЭН порталных кранов на ступеньках, приводит к дополнительному увеличению технических потерь ЭЭ в СЭС речных портов от 10 % до 46 % при работе порталных кранов с навалочным грузом.

© Платонов Д.Ю., 2020

© Голубева Н.Д., 2020

© Степанов В.П., 2020

Библиографический список

- [1] Гордеев В.И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
- [2] Каялов Г.М. Определение потерь энергии в электрических сетях по средним значениям нагрузок в ее узлах // Электричество. 1976. № 6. С. 19-26.
- [3] Кирпичников Л.А., Хариф М.И. Энергоснабжение и электросети порта. 2-е изд. М.: Транспорт, 1975. – 192 с.
- [4] Надтока И.И., Семенова О.Г. Расчеты потерь электроэнергии в сетях 6, 10 кВ с учетом неравномерности и коррелированности нагрузки узлов // Известия Высших Учебных Заведений. Северо-Кавказский Регион. Технические Науки. 2006. № 15. С. 136-138.
- [5] Надтока И.И., Сколпина О.Г. Методика учета формы графиков нагрузки при расчётах потерь электроэнергии в сетях 6 - 10 кВ // Известия Высших Учебных Заведений. Северо-Кавказский Регион. Технические Науки. 2014. № 6 (181). С. 32-35.
- [6] Степанов В.П., Безменова Н.В., Зубарева К.С. Дополнительные потери электроэнергии в электрических сетях, питающих электродуговые сталеплавильные печи // IV Всерос. науч.-практ. конф. с межд. уч. «Актуальные проблемы энергетики», Декабрь 21, 2018, Нижний Новгород, Россия. С. 295-300.
- [7] Аверьянова К.С., Безменова Н.В., Гудков А.В., Кротков Е.А., Соляков О.В., Степанов В.П. Оценка расчетных потерь электроэнергии в электрических сетях, питающих специальные промышленные установки // Электро. Электротехника, Электроэнергетика, Электротехническая промышленность. 2015. № 3. С. 34-37.

- [8] Шошмин В.А. Исследование особенностей электрических нагрузок и разработка методов их расчета для порталных кранов речных портов: автореф. дис. канд. техн. наук, Ленинградский институт водного транспорта. Ленинград, 1974. – 31 с.
- [9] Волобринский С.Д., Каялов Г.М., Клейн П.Н., Мешель Б.С. Электрические нагрузки промышленных предприятий. Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
- [10] Баламетов А.Б., Мамедов С.Г., Алиев Х.Т., Халилов Э.Д. Оценка погрешностей расчета коэффициента формы графиков нагрузки на основе их имитационного моделирования // *Электричество*. 2011. № 8. С. 15-22.
- [11] Platonov D., Stepanov V., Golubeva N. The influence of the probabilistic nature of the graphs of the electrical load of river port cranes on the additional calculated power losses // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia, 2019. P. 1-4.

D.Y. Platonov, N.D. Golubeva, V.P. Stepanov

ERROR IN CALCULATION OF ELECTRICITY LOSSES IN ELECTRICAL NETWORKS OF RIVER PORT CRANES

Samara State Technical University
Samara, Russia

Abstract. A quantitative assessment of the impact of additional information on the characteristics of individual graphs of the electric load of cranes on the technical losses of electricity in the power supply systems of river ports is given. Therefore, the electric loads of cranes are crucial for the mode of electricity consumption in the power supply systems of river ports. During the operation of power supply systems for river ports, technical losses of electricity are determined by step-by-step graphs of the electrical load. Step-by-step averaging conceals the sharply variable nature of the initial graphs of the electric load of portal cranes and triggers the mechanism of additional error in the estimation of technical losses of electricity. Accounting for random and abrupt changes in the ordinates of the initial graphs of the electric load of cranes on step graphs of the electric load is carried out by additional information: the type and parameters of the correlation function of individual graphs of the electric load of portal cranes. Here, the correlation function acts as a characteristic of the relationship between abrupt changes in the ordinates of the original graphs, reflecting the technological process of processing all types of cargo. Therefore, the probabilistic model of the initial graphs of the electric load of portal cranes is represented as a random, stationary process with an exponential-cosine-sine correlation function. To restore the shape coefficients that characterize the unevenness of the initial graphs of the electric load on the steps, the method of probabilistic modeling is used. The method allows us to determine additional unevenness on the steps caused by abrupt changes in the ordinates of the original electric load graphs. The type and parameters of the correlation function of the initial graphs of the electric load of cranes were obtained experimentally in the power supply systems of river ports. The

experiments cover loading gantry cranes with a load capacity from 1.5 to 30 tons when working with bulk, piece and timber loads. It is shown that at extreme range of variation of shape coefficients of the step-by-step graph of the electric loading from 1.15 to 1.2, the area of the restored shape coefficients of the initial graphs is in the range: the bottom from 1.21 to 1.28, and the upper from 1.48 to 1.63. An additional increase of technical losses is in the range from 10 to 46 %.

Keywords: coefficient of oscillation, correlation function of the graph, electric load graph, portal crane, shape coefficients, step-by-step graph, technical losses of energy.

References

- [1] V. Gordeev, *Regulirovanie maksimuma nagruzki promyshlennykh elektricheskikh setey [Regulation of maximum load of industrial electrical networks]*. Moscow: Energoatomizdat, 1986 (in Russian).
- [2] G.M. Kayalov, "Opredelenie poter' energii v elektricheskikh setyakh po srednem znacheniyam nagruzok v ee uzlah [Determination of energy losses in electric networks by the average values of loads in its nodes]", *Elektrichestvo*, no. 6, pp. 19-26, 1976 (in Russian).
- [3] L.A. Kirpichnikov and M.I. Kharif, *Energosnabzhenie i elektroseti porta [Power supply and power grids of the port]*. 2nd ed. Moscow: Transport, 1975 (in Russian).
- [4] I.I. Nadtoka and O.G. Semenova, "Raschety poter' energii v elektricheskikh setyakh 6, 10 kV s uchetom neravnomernosti i korrelirovannosti nagruzki uzlov [Calculations of electricity losses in 6, 10 kV networks, taking into account the unevenness and correlation of the load of nodes]", *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, no 15, pp. 136-138, 2006 (in Russian).
- [5] I.I. Nadtoka and O.G. Skolpina, "Method of accounting for load curve when calculating losses in networks 6 - 10 kV", *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*, no. 6, pp. 32-35, 2014.
- [6] V.P. Stepanov, N.V. Bezmenova and K.S. Zubareva, "Dopolnitel'nye poteri elektroenergii v elektricheskikh setyakh, pitayushchih elektrodugovoye staleplavil'nye pechi [Additional power losses in electric networks supplying electric arc steel furnaces]", in. proc. *All-Russian Conf. Aktual'nye problemy energetiki [Actual problems of electric power industry]*, Dec. 21, 2018, Nizhny Novgorod, Russia, pp. 295-300 (in Russian).
- [7] K.S. Aver'yanova, N.V. Bezmenova, A.V. Gudkov, E.A. Krotkov, O.V. Solyakov and V.P. Stepanov, "Ocenka raschetnykh poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh, pitayushchih special'nye promyshlennye ustanovki [Estimation of the calculated losses of electric power in the power supply networks of special industrial plants]", *Electrical engineering, electric power, electrical industry [Elektro. Elektrotehnika, Elektroenergetika, Elektrotekhnicheskaya promyshlennost']*, no. 3, pp. 34-37, 2015 (in Russian).
- [8] V.A. Shoshmin "Issledovanie osobennostey elektricheskikh nagruzok i razrabotka metodov ih rascheta dlya portal'nykh kranov rechnykh portov [Study of the features of electrical loads and development of methods for their calculation for gantry cranes

- of river ports]*”, Cand. of Tech. S. thesis, Leningrad Institute of Water Transport, Leningrad, Russia, 1974 (in Russian).
- [9] S.D. Volobrinский, G.M. Kayalov, P.N. Kleyn and B.S. Meshel’, *Elektricheskie nagruzki promyshlennykh predpriyatij [Electrical loads of industrial enterprises]*. Leningrad: Energy, 1971 (in Russian).
- [10] A.B. Balametov, S.G Mamedov, H.T. Aliev and E.D. Halilov, “Ocenka pogreshnostej rascheta koefficienta formy grafikov nagruzki na osnove ih imitacionnogo modelirovaniya [Estimation of errors of calculation of the coefficient of shape of load graphs on the basis of their simulation]”, *Elektrichestvo*, no. 8, pp. 15-22, 2011 (in Russian).
- [11] D. Platonov, V. Stepanov and N. Golubeva, "The influence of the probabilistic nature of the graphs of the electrical load of river port cranes on the additional calculated power losses," in proc. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Ufa, Russia, 2019, pp. 1-4.