

Захарова Алла Геннадьевна, доктор техн. наук, профессор, **Лобур Ирина Анатольевна**, кандидат техн. наук, доцент, **Шаулева Надежда Михайловна**, кандидат техн. наук, доцент

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, кафедра электропривода и автоматизации, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

e-mail: zaharovaag@gmail.com

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАГРУЗОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ РАЗРЕЗОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

Аннотация: Расчет нагрузок и потерь в электрических сетях разрезов связан с трудностями, вызванными неравномерностью индивидуальных графиков нагрузки экскаваторов – основных и наиболее энергоемких потребителей. Представлен метод расчета по нагрузочным диаграммам, позволяющий учесть неравномерность проявления нагрузки в течение цикла экскавации, что существенно повышает точность расчетов потерь в сетях по сравнению с расчетом по среднеквадратическому току.

Ключевые слова: электрические нагрузки, потери электроэнергии, расчетная мощность экскаватора, карьерные экскаваторы, угольный разрез.

Информация о статье: принята 25 октября 2019 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-52-56

Расчет нагрузок и потерь в электрических сетях разрезов связан с трудностями, вызванными неравномерностью индивидуальных графиков нагрузки экскаваторов – основных и наиболее энергоемких потребителей [1-4]. Все ковшевые экскаваторы (мехлопаты и драглайны) обладают общей закономерностью электропотребления – ярко выраженной цикличностью, обусловленной последовательностью выполняемых машиной операций в технологическом процессе [5, 6]. По этой причине формирование нагрузки одиночной машины целесообразно рассматривать в течение технологического цикла, когда каждая операция – черпание, подъем ковша с грузом, поворот и разгрузка – характеризуются своим уровнем и характером электропотребления [7-9]. В пользу такого подхода говорят различия между индивидуальными и групповыми графиками нагрузки экскаваторов.

Нагрузки экскаваторов

Наблюдения за характером электропотребления на отходящих от подстанций присоединениях и на вводах подстанций на разрезах «Кедровский» и «Черниговский» в Кузбассе показали различие в характере формирования нагрузки одиночными экскаваторами и их группой, питающихся от одного присоединения. Установлено, что вид функции распределения случайного процесса формирования нагрузки группой экскаваторов определяется вероятностью работы каждого из них, которая зависит от продолжительности рассмотрения процесса. Вероятность работы l независимых приемников от общего их числа n можно оценить по биномиальному закону распределения. На практике интерес представляет вероятность

значения общей нагрузки включенных электроприемников. Измерения показали, что уже при двух экскаваторах, питающихся от одного присоединения, распределение общей нагрузки стремится к нормальному закону, для характеристики которого достаточно знать математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение.

При расчетах потерь электроэнергии удобно оперировать не значением общей нагрузки группы экскаваторов, питающихся от одной линии, а нагрузкой каждого из них в отдельности [10, 11]. Точное представление о характере формирования нагрузки дает ее диаграмма в течение цикла экскавации.

Для определения вида и параметров распределения были изучены диаграммы записи нагрузки мехлопат (рис. 1) и драглайнов (рис. 2), работающих в различных условиях.

Для каждого цикла по диаграммам определялись длительность цикла и паузы и число пиков нагрузки разных уровней за время 10 с. По этим данным были построены гистограммы нагрузки, показанные на

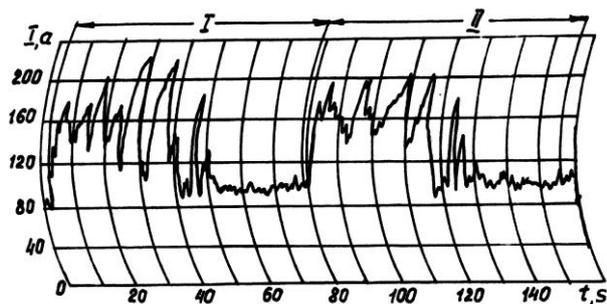


Рис. 1. Диаграмма нагрузок экскаватора ЭКГ-8
Fig. 1. Diagram of EKG-8 rope shovel loadings

рис. 2. Эти гистограммы можно представить в виде композиции двух законов распределения – равномерного и экспоненциального (рис. 3, 4), многоугольники которых, соответственно, есть OABD и LMNB. Часть распределения CDEK представляет маловероятные значения пиков нагрузки, занимающие не более 7,5%.

Такое представление возможно при условии, что нагрузка каждого уровня формируется независимо от нагрузки других уровней, то есть на них действуют независимые случайные величины [12, 13]. Общая плотность распределения нагрузки имеет вид

$$f(P_0) = f(P_p)f(P_e),$$

где P_p и P_e – символы нагрузок, имеющих, соответственно, равномерное и экспоненциальное распределения.

Приняв во внимание, что минимальная нагрузка соответствует холостому ходу двигателя экскаватора P_x , а максимальная – P_m (рис. 3, 4), получим плотности равномерного

$$f(P_p) = \frac{1}{P_m - P_x}$$

и экспоненциального распределений

$$f(P_e) = \frac{1}{P_c} \exp(-P/P_c),$$

где P_c – средняя нагрузка для экспоненциально распределенной его части.

Общая плотность распределения

$$f(P_0) = \frac{1}{P_m - P_x} \int_{P_x}^{P_m} \frac{1}{P_c} \exp(-P/P_c) dP.$$

Композиция законов распределения

Задачу композиции законов распределения удобно решить через аппарат характеристических функций [14, 15], используя выражение

$$G(P) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{jP(P_c)} f(P) dP,$$

поскольку характеристическая функция для композиции случайных величин равна произведению их характеристических функций.

Для экспоненциального закона распределения характеристическая функция имеет вид

$$G_{p,e}(P) = (1/P_e) e^{jPP_x} / [(1/P_e) - jP].$$

Для равномерного закона распределения характеристическая функция определится как

$$G_{p,p}(P) = (e^{jPP_m} - e^{jPP_x}) / [jP(P_m - P_x)].$$

В результате получаем характеристическую функцию для композиции законов распределений в виде

$$G_{o,c}(P) = G_{p,p}(P)G_{p,e}(P) = (1/P_e) \left(\frac{e^{jP(P_m+P_x)} - 1}{jP(P_m - P_x)} \right) \left[\frac{1}{(1/P_e) - jP} \right].$$

Среднее значение находится по формуле

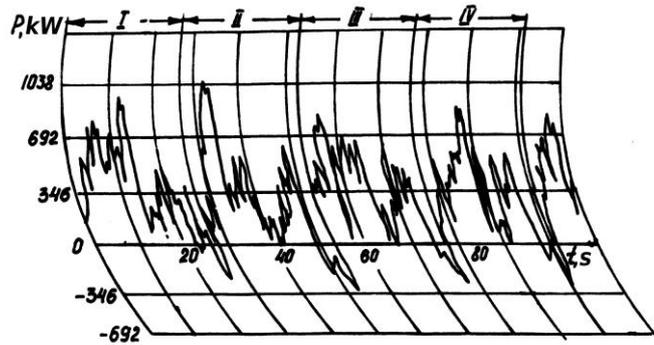


Рис. 2. Диаграмма нагрузок экскаватора ЭШ-14/65
Fig. 2. Diagram of ESh-14/65 dragline loadings

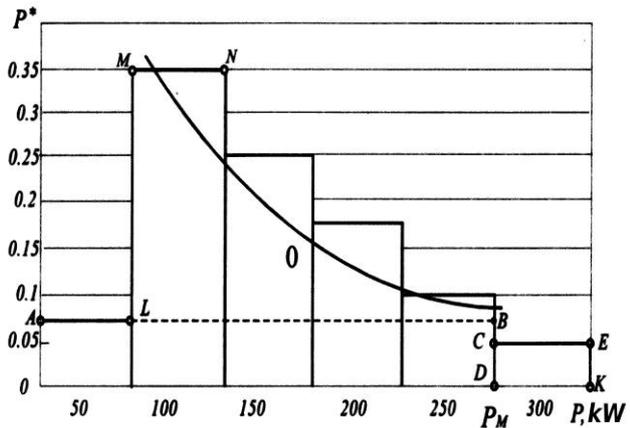


Рис. 3. Гистограммы распределения мощности за один цикл экскавации ЭКГ-8

Fig. 3. Histograms of power distribution per one cycle of shoveling of EKG-8

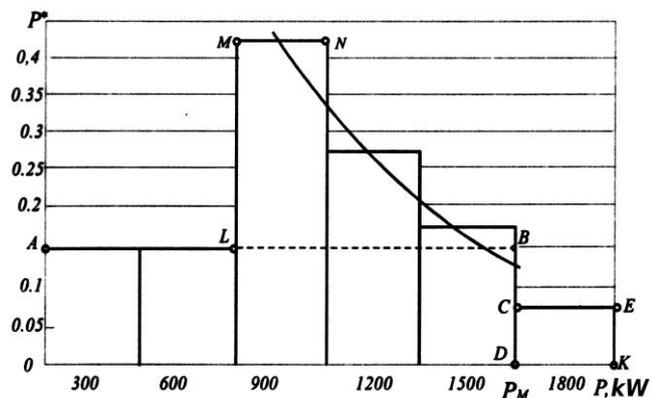


Рис. 4. Гистограммы распределения мощности за один цикл экскавации ЭШ-14/65

Fig. 4. Histograms of power distribution per one cycle of shoveling of ESh-14/65

$$P_{o,c} = M[P] = -G'(0).$$

В результате дифференцирования и перехода к пределу $P \rightarrow 0$, получаем выражение для общего среднего композиции двух законов распределения

$$P_{o,c} = [0,5P_m^2 - 1,5P_mP_x - 5,5P_x^2 - (1/P_e)] / (P_m - P_x).$$

Изложенный подход дает качественную картину. Для получения количественной оценки

Таблица 1. Расчетные коэффициенты β и σ_p

Table 1. The calculated coefficients β and σ_p

Тип экскаватора		β	σ_p
Мехлопаты		1,09	$0,11P_n$
Драглайны		1,1 – 1,12	$0,09P_n$

удобно исходить из номинальной мощности двигателя экскаватора:

$$P_c = P_n k_i,$$

где k_i – коэффициент использования, равный 0,83 – 0,85 для экскаваторов-мехлопат и 0,87-0,89 – для драглайнов.

В полученном выражении не учтена часть нагрузки, изображенная на гистограммах прямоуглольником DCEK. Эту часть диаграммы удобно представить в виде случайных выбросов нагрузки за некоторый фиксированный уровень P_m . Очевидно, что случайный процесс выбросов как во времени, так и по величине не является непрерывным. Для его характеристики можно использовать среднее число выбросов N_B за расчетный интервал времени, среднюю продолжительность $\tau_{B,cp}$ и среднюю амплитуду $A_{B,cp}$. При достаточно высоком уровне P_m случайного процесса, относительно которого определяются выбросы, вероятность их появления имеет распределение Пуассона с параметром $a=I$ в течение 10 с. Основной трудностью расчета характеристик выбросов является необходимость выражать их через характеристики исходного процесса, поскольку статистическая информация о выбросах на практике отсутствует.

Введем допущение о наличии стационарного процесса, который характеризуется законами распределения и корреляционными функциями. Корреляционная функция процесса $K(\tau)$ при $\tau = 0$ равна дисперсии процесса $D(P)$, а при $\tau \geq I$ может характеризовать число пересечений реализаций процесса фиксированного уровня P_m :

$$P_m = P_c + \beta \sigma_p,$$

где β – кратность среднеквадратического отклонения случайного процесса, зависящая от вероятности превышения ординатами процесса расчетного уровня P_m ; σ_p – среднеквадратическое отклонение мощности.

Мощность, определяемая по соотношению (1), является расчетной мощностью, потребляемой экскаватором без учета выбросов. В таблице приведены значения β и σ_p по отношению к номинальной мощности двигателей экскаваторов P_n , полученные на основе расчета их нагрузок по диаграммам.

С учетом значений β и σ_p из таблицы соотношение (1) примет следующий вид:

$$\text{для драглайнов } P_{m1} = P_c + 0,09\beta P_{n1} \quad (2)$$

$$\text{для мехлопат } P_{m2} = P_c + 0,11\beta P_{n2}.$$

В [1] показано, что число выбросов мощности за пределы P_m определяется по значению нормированной корреляционной функции, значению интегральной функции распределения ординат процесса при $P = P_m$ и кратности среднеквадратического отклонения β . Исследования диаграмм нагрузок показали,

что корреляционная функция затухает с постоянной времени $\tau = 10$ с, а длительность выбросов, имея экспоненциальный характер распределения и среднее значение 7-12 с, не может оказать решающего значения на нагрев проводников питающей линии и может не учитываться. Основное влияние на потери в линии электропередачи оказывает мощность, определяемая с учетом неравномерности проявления нагрузки в течение цикла экскавации.

Получаемый с помощью формул системы уравнений (2) I_m ток позволяет более точно учесть фактические потери в электрических сетях. Расчеты показали, что точность учета потерь повышается по сравнению с общепринятым методом на основе среднеквадратического тока на 18-21%.

Выводы

1. Нагрузка одиночного экскаватора за один цикл экскавации характеризуется композицией равномерного и экспоненциального распределений.
2. Расчетная мощность экскаватора превышает ее среднее значение в силу неравномерности нагрузки за цикл экскавации.
3. Применение расчетной мощности, учитывающей неравномерность нагрузки экскаватора за цикл экскавации, повышает точность расчетов потерь в сетях по сравнению с расчетом по среднеквадратическому току на 18-21%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сюсюкин А.И. Энергоснабжение предприятий: надёжность, экономичность, энергосбережение. СПб.: ГЦЭ-Энергетика, 2008. – 302 с.
2. Пивняк Г.Г. Горное предприятие как объект энергопотребления // Горный журнал - спец-выпуски. - 2004. -№ 7.- С. 3-6.
3. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. М.: ИНЭИ РАН, 2014. – 175 с.
4. Гойхман В.М. Методика определения фактических значений основных параметров электропотребления, используемых при расчетах за электроэнергию на предприятиях угольной промышленности / В.М. Гойхман, Ю.П. Миновский. – М.: изд. ИГД им. А.А. Скочинского, 1981. – 190 с.
5. Белых Б.П. Электрические нагрузки и электропотребление на горнорудных предприятиях / Б.П. Белых, И.С. Свердель, В.К. Олейников. – М.: Недра, 1971. – 247 с.
6. Олейников В.К. Анализ и планирование электропотребления на горных предприятиях. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
7. Захарова А.Г., Разгильдеев Г.И. Структура энергопотребления и ресурсы энергосбережения на шахтах Кузбасса // Уголь. – 2000. – №7. – С. 48–50.
8. Zakharova A.G. Impact Assesment of Mining and Geological Factors of Kuzbass Coal Mines on their Power Consumption / Zakharova A.G., Lobur I.A., Shauleva N.M., Borovtsov V.A. // Coal in the 21st

Century: Mining, Processing and Safety. 2016. - P. 198 - 201.

9. Zakharova A.G. Research of Loadings Character in Electrical Networks of Open-Casts Mining / Zakharova A.G., Lobur I.A., Shauleva N.M., Borovtsov V.A. // IVth International Innovative Mining Symposium. 2019. - № 3. - P. 1 - 6.

10. Bhowmik, D. V. Rajan, S. P. Bose. Load Flow Analysis: An Overview -World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2012. - Vol. 6. - № 3.

11. Кудрин Б.И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Промышленная энергетика, 2000. - №6. - С. 33-36.

12. Загс Лотар. Статистическое оценивание. - М.: Статистика, 1976. - 325 с.

13. Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. М.: Наука, 1970. - 165 с.

14. Сигел Э. Практическая бизнес-статистика: Пер. с англ. // М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. - 1050 с.

15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей // М.: Высш. Шк., 1999. - 576 с.

Alla G. Zakharova, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Irina A. Lobur**, Ph. D. in Engineering, Associate Professor, **Nadezhda M. Shauleva**, Ph. D. in Engineering, Associate Professor

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Department of Electric Drive and Automation, 28, Vesennaya St., 650000, Kemerovo

e-mail: zaharovaag@gmail.com

FORECAST OF LOADS IN ELECTRIC NETWORKS OF OPEN-PIT COAL MINES USING A PROBABILISTIC APPROACH

Abstract. Calculation of loads and losses in electrical networks of open-cast mines involves the difficulties caused by irregularity of individual production schedules of rope shovels – the main and most power-intensive consumers. The computational method according to load charts is presented. It allows to consider irregularity of loading manifestation during an excavation cycle that significantly increases accuracy of calculations of losses in the networks in comparison with RMS current calculation.

Keywords: electric loads, electric power losses, shovel rated capacity, open-pit shovels, open-cast mining.

Article info: received October 25, 2019

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-5-52-56

REFERENCES

1. Syusyukin A. I. Energosnabzhenie predpriyatiy: nadezhnost, ekonomichnost, energo-sberezhenie. SPb.: GTsE-Energetika, 2008. - 302 p.

2. Pivnyak G. G. Gornoe predpriyatие kak objekt energopotrebleniya // Gornyy zhurnal - spets-vypuski. - 2004. -№ 7.- P. 3-6.

3. Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda. M.: INEI RAN, 2014. - 175 p.

4. Goykhman V.M. Metodika opredeleniya fakticheskikh znacheniy osnovnykh parametrov elektropotrebleniya, ispolzuemykh pri raschetakh za elektroenergiyu na predpriyatiyakh ugolnoy promyshlennosti / V.M. Goykhman, Yu.P. Minovskiy. - M.: izd. IGD im. A.A. Skochinskogo, 1981. - 190 p.

5. Belykh B.P. Elektricheskie nagruzki i elektropotreblenie na gornorudnykh predpriyatiyakh / B.P. Belykh, I.S. Sverdel, V.K. Oleynikov. - M.: Nedra, 1971. - 247 p.

6. Oleynikov V.K. Analiz i planirovanie elektropotrebleniya na gornykh predpriyatiyakh. - M.: Nedra, 1983. - 192 p.

7. Zakharova A.G, Razgildeev G.I. Struktura energopotrebleniya i resursyenergosbe-rezheniya na shahtah Kuzbassa // Ugol. - 2000. - №7. - P. 48-50.

8. Zakharova A.G. Impact Assesment of Mining and Geological Factors of Kuzbass Coal Mines on their Power Consumption / Zakharova A.G., Lobur I.A., Shauleva N.M., Borovtsov V.A. // Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety. 2016. - P. 198 - 201.

9. Zakharova A.G Research of Loadings Character in Electrical Networks of Open-Casts Mining / Zakharova A.G., Lobur I.A., Shauleva N.M., Borovtsov V.A. // IVth International Innovative Mining Symposium. 2019. - № 3. - P. 1 - 6.

10. Bhowmik, D.V. Rajan, S.P. Bose. Load Flow Analysis: An Overview -World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering. 2012. - Vol. 6. - № 3.

11. Кудрин Б.И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Промышленная энергетика, 2000. - №6. - С. 33-36.

12. Zags Lotar. Statisticheskoe ocenivanie. – М.: Statistika, 1976. – 325 p.

13. Kassandrova O.N. Obrabotka rezul'tatov nablyudeniya / O.N. Kassandrova, V.V. Le-bedev. М.: Nauka, 1970. – 165 p.

14. Sigel E. Prakticheskaya biznes-statistika: Per. s angl. // М.: Izdatelskiy dom «Vilyams», 2004. – 1050 p.

15. Venttsel E.S. Teoriya veroyatnostey // М.: Vyssh. Shk., 1999. – 576 p.

Библиографическое описание статьи

Захарова А.Г., Лобур И.А., Шаулева Н.М. Прогнозирование нагрузок в электрических сетях разрезов с применением вероятностного подхода // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 5 (145). – С. 52-56.

Reference to article

Zakharova A.G., Lobur I.A., Shauleva N.M. Fore-cast of loads in electric networks of open-pit coal mines using a probabilistic approach. // Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 5 (145), pp. 52-56.