



DOI: 10.18721/JEST.25107
УДК 621.311.1

К.А. Хомяков, Д.А. Устинов

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

О НЕОБХОДИМОСТИ КОРРЕКТИРОВКИ МЕТОДА РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Расчет электрических нагрузок – первостепенная задача при проектировании любой системы электроснабжения, а достоверность получаемых значений нагрузок прямым образом влияет на технико-экономические показатели всего предприятия. В статье рассматриваются этапы развития методов и подходов по определению расчетных значений электрических нагрузок – от опытного представления 20-х годов XX века до современных методов. Подробно рассматривается утвержденный метод расчета нагрузок и проводится его проверка путем сравнения достоверности справочных данных и фактических значений коэффициента использования, полученных в результате экспериментальных исследований на объекте горно-обогатительного производства. Показано, что проводимые мероприятия по повышению энергетической эффективности предприятия приводят к необходимости корректировки коэффициентов, используемых в существующем методе расчета электрических нагрузок.

Ключевые слова: расчет электрических нагрузок, коэффициент использования, коэффициент расчетной нагрузки, мероприятия по энергосбережению, корреляционная связь.

Ссылка при цитировании:

К.А. Хомяков, Д.А. Устинов. О необходимости корректировки метода расчета электрических нагрузок для предприятий минерально-сырьевого комплекса // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 71–78. DOI: 10.18721/JEST.25107.

K.A. Khomiakov, D.A. Ustinov

Saint-Petersburg mining university, St. Petersburg, Russia

ADJUSTING THE METHOD FOR CALCULATION OF ELECTRICAL LOADS FOR ENTERPRISES OF MINERAL RESOURCES INDUSTRY

Calculation of electrical loads is the primary task in design of each power supply system, and the reliability of the values obtained from such calculations directly affects the technical and economic indicators of the entire enterprise. This article discusses all stages of development of methods and approaches for determining the calculated values of electrical loads from experimental representation in the 1920s to modern methods. The approved method for calculation of loads is considered in detail and tested for reliability of the reference data and the actual values of the utilization coefficient obtained as a result of the studies carried out for the object of mining and processing production. We have confirmed the influence of the measures to improve energy efficiency and, as a consequence, the need to adjust the existing method for calculation of electrical loads.

Keywords: calculation of electrical loads, utilization factor, calculated load factor, energy saving measures, correlation.

Citation:

K.A. Khomiakov, D.A. Ustinov, Adjusting the method for calculation of electrical loads for enterprises of mineral resources industry, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 25(01)(2019) 71–78, DOI: 10.18721/JEST.25107.

Введение

Высокие темпы, с которыми развивается энергетика, требуют повышения эффективности капиталовложений и материальных затрат. Сегодня порядка двух третей от потребляемой электроэнергии приходится на промышленные предприятия. Поэтому еще на этапе проектирования необходимо применять меры по повышению их технико-экономических показателей. Одна из первоочередных задач при проектировании промышленных предприятий – определение электрических нагрузок; достоверность получаемых при таких расчетах значений напрямую влияет на технико-экономические показатели всего предприятия. Расчетные электрические нагрузки используются при выборе элементов системы электроснабжения. Занижение или завышение расчетных значений приводит к большим потерям и увеличению капитальных затрат [2, 3]. Достоверность же значений зависит от методов, применяемых для расчета электрических нагрузок. Цель данной статьи – корректировка и повышение точности метода определения расчетных нагрузок.

Методы расчета электрических нагрузок

Методы расчета значимо изменялись: от опытных измерений 20-х годов XX века до современных методов, использующих математический аппарат теории вероятностей и случайных процессов.

Исследования в области электрических нагрузок начались с 30-х годов прошлого столетия. Но недостаточность теоретических и экспериментальных данных не позволяли с приемлемой достоверностью использовать их результаты.

Вторым периодом в развитии теории электрических нагрузок по праву считаются 50-е годы XX века. Была создана информационная база за счет проведения на промышленных предприятиях большого количества экспериментальных исследований и разработаны методы математической статистики, позволившие создать математические модели, опираясь на теорию случайных величин. Как результат в 1968 году вышли «Указания по определению

электрических нагрузок промышленных установок», в основу которых лег метод упорядоченных диаграмм (МУД) [1]. В соответствии с МУД расчетное значение коэффициента использования определяется выражением

$$k_{и\ p} = \bar{k}_{и\ cр} \left(1 + \frac{\sqrt{3}\sigma_{k_{и}}}{\sqrt{n_3}} \right) = \bar{k}_{и\ cр} \left(1 + \frac{\sqrt{3}\sqrt{f_{к_{и}}^2 - 1}}{\sqrt{n_3}} \right), \quad (1)$$

где $\bar{k}_{и\ cр}$ – математическое ожидание коэффициента использования характерной категории электроприемников; $\sigma_{k_{и}}$ – среднее квадратическое отклонение коэффициента использования $k_{и}$, приведенное к одному электроприемнику; $f_{к_{и}}$ – коэффициент формы упорядоченной диаграммы коэффициентов использования; n_3 – эффективное число электроприемников. Однако отсутствие информационно-справочных данных по $\bar{k}_{и\ cр}$ и $f_{к_{и}}$ для характерных категорий электроприемников не позволяет считать результаты, получаемые данным методом, полностью достоверными: показатели электропотребления по результатам обследования действующих предприятий свидетельствует о завышении полученной таким методом расчетной максимальной нагрузки цехов над фактическим значением в 1,5–2,5 раза.

На смену указанию 1968 года пришли обновленные указания по расчету электрических нагрузок РТМ 36.18.32.4-92, действующие с 01.01.1993 года по сегодняшний день. Новые указания были разработаны ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», огромный вклад в эту работу внесли такие ученые, как Б.Д. Жохов, Л.Б. Годгельф. За основу в них принят модифицированный статистический метод (МСМ). В соответствии с МСМ расчетное значение коэффициента спроса определяется выражением

$$k_c = k_{и\ p} + \frac{0,5 - 0,4k_{и}}{\sqrt{n_3 T / T_0}} = \bar{k}_{и\ cр} + \frac{k_{и} - \bar{k}_{и\ cр}}{\sqrt{n_3}} + \frac{0,5 - 0,4k_{и}}{\sqrt{n_3 T / T_0}}, \quad (2)$$

где $T_0 = 10$ мин – постоянная времени нагрева проводников малого и среднего сечений; T –

фактическая постоянная времени нагрева элементов системы электроснабжения; $k_{и}$ – средневзвешенное справочное значение коэффициентов использования для характерных категорий электроприемников; $\bar{k}_{и\text{cp}}$ – математическое ожидание коэффициента использования группы электроприемников. МСМ основан на использовании уравнения регрессии, которое характеризует корреляционную связь между величинами $\bar{k}_{и\text{cp}}$ и $k_{и}$; эти зависимости показаны на рис. 1 [1].

Корреляционный анализ совокупности парных значений $k_{и}$ и $\bar{k}_{и\text{cp}}$ позволил установить, что наиболее тесная связь между этими параметрами имеет место при разбиении совокупности на два диапазона ($k_{и} < 0,5$ и $k_{и} \geq 0,5$) при числе точек в каждом диапазоне $N_{г} > 50$, что свидетельствует о достаточной значимости исследуемой зависимости [11, 12]. С использованием метода наименьших квадратов получены уравнения линий регрессии для первого и второго диапазонов $k_{и}$:

$$\bar{k}_{и\text{cp}} = 0,58k_{и} - 0,05 \text{ при } k_{и} < 0,5; \quad (4)$$

$$\bar{k}_{и\text{cp}} = 0,7k_{и} - 0,12 \text{ при } k_{и} \geq 0,5. \quad (5)$$

Значения $\bar{k}_{и\text{cp}}$, полученные по уравнениям (4) и (5), являются усредненными частными (выборочными) значениями коэффициентов использования групп электроприемников, характеризующими математическое ожидание при известном средневзвешенном справочном значении $k_{и}$ [4, 9].

Согласно МСМ при определении максимальной по допустимому нагреву нагрузки для одной трансформаторной подстанции (ТП) средняя ее компонента должна вычисляться не по математическому ожиданию, а по верхней границе доверительных интервалов $k_{и\text{cp}(г)}$ нормального закона распределения частных значений $\bar{k}_{и\text{cp}}$ для первого и второго диапазонов, которые могут быть превышены с вероятностью не более 0,05:

$$k_{и\text{cp}(г)} = 0,6k_{и} \text{ при } k_{и} < 0,5; \quad (6)$$

$$k_{и\text{cp}(г)} = 0,8k_{и} \text{ при } k_{и} \geq 0,5. \quad (7)$$

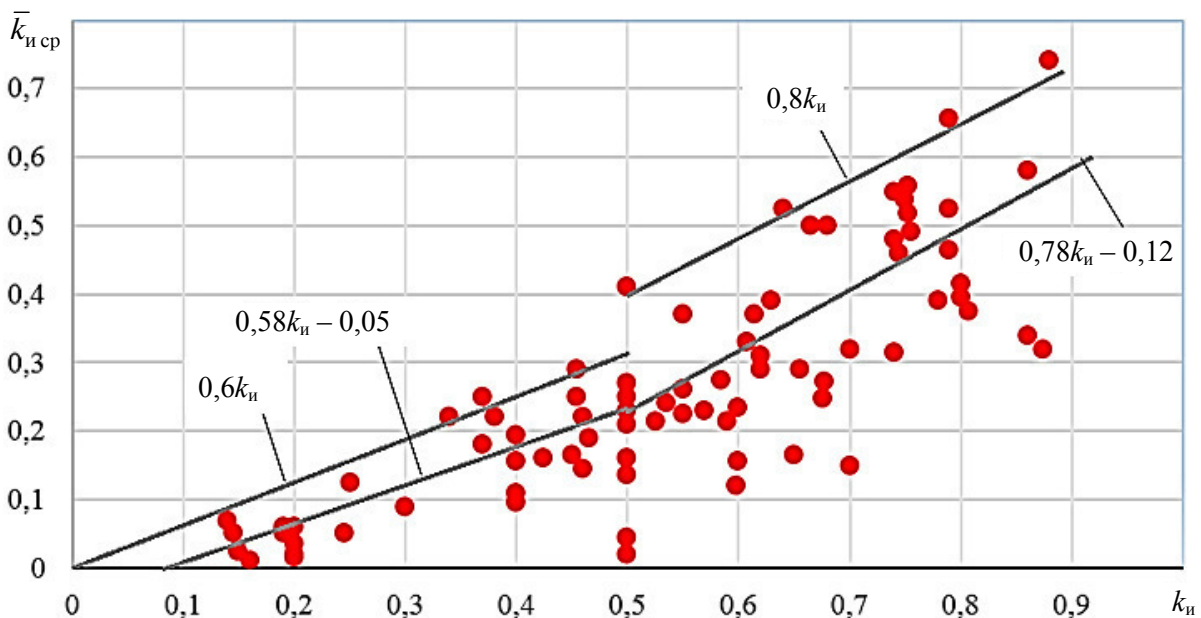


Рис. 1. Корреляционный анализ совокупности парных значений $k_{и}$ и $\bar{k}_{и\text{cp}}$

Fig. 1. Correlation analysis of the set of paired values of $k_{и}$ and $\bar{k}_{и\text{cp}}$ (av)

Формула для расчета активной мощности:

$$P_p = k_p k_i P_{ном}, \quad (8)$$

где k_p — коэффициент расчетной активной нагрузки, равный отношению коэффициента спроса группы электроприемников к средне-взвешенному справочному значению k_i , определенному как детерминированная величина, характеризующая верхнюю границу возможных значений коэффициентов использования электроприемников:

$$k_p = k_c / k_i. \quad (9)$$

Таким образом, МСМ позволил снизить погрешность определения электрических нагрузок, сохранив при этом возможность использования существующей справочно-информационной базы значений k_i [10].

Обоснование корректировки утвержденного метода

После вступления в силу федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» возникла необходимость проведения технического перевооружения всех промышленных объектов, в том числе предприятий минерально-сырьевого комплекса, как одних из самых энергоемких объектов [5, 7]. Основная цель проведения мероприятий по энергосбережению — снизить потребление электроэнергии. Частным случаем таких мероприятий является применение на технологических установках регулируемых электроприводов, имеющих в своем составе преобразователи частоты (ПЧ), а также другого энергоэффективного электрооборудования [6]. Между тем существующие методы определения расчетных нагрузок и информационные базы не учитывают изменения, произошедшие в энергосистемах за последние годы. Поэтому необходимо проведение исследований по выявлению зависимости потребления мощности от применения современного оборудования и проводимых меро-

приятий по энергосбережению. И в методах расчета нагрузок необходимо учитывать индивидуальные особенности современных технологических процессов, при необходимости осуществляя корректировки коэффициентов, используемых в расчетах [8, 13, 16]. В частности с этой целью на объекте горно-обогатительного производства были проведены исследования зависимости потребления мощности электроприводом конвейера 2Л-120 от скорости конвейерной ленты и характера загрузки конвейера рудной массой.

Экспериментальные исследования

Привод конвейера включает следующие компоненты: приводные трехфазные асинхронные электродвигатели 660 В, 250 кВт (2 шт.); трехфазные преобразователи частоты 660 В, 250 кВт (2 шт.); вентиляторы принудительного охлаждения приводных электродвигателей 660 В (2 шт.); установка водяного охлаждения преобразователей частоты (1 шт.).

На рис. 2 представлены зависимости изменения активной и реактивной мощностей, потребляемых приводом конвейера, от скорости конвейерной ленты как без регулирования, так и с автоматическим регулированием этой скорости.

Были получены также графики изменения во времени активной мощности конвейерной установки с нерегулируемым (рис. 3) и регулируемым электроприводом (рис. 4). По результатам исследования было выявлено несоответствие полученных и справочных значений k_i индивидуальных потребителей как при регулируемой скорости конвейерной ленты, так и без регулирования.

Данные, полученные в результате проведения испытаний конвейера, сведены в табл. 1. Испытания проводились в двух режимах: с постоянной скоростью 3,15 м/с и в режиме автоматического регулирования скорости конвейерной ленты

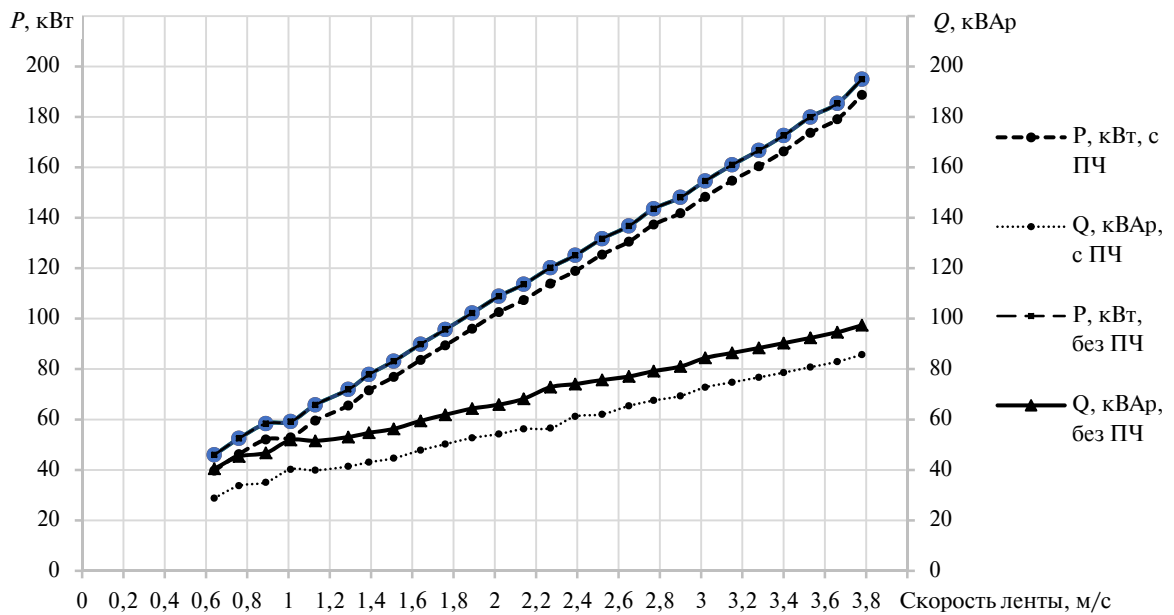


Рис. 2. Зависимость изменения активной и реактивной мощности, потребляемой приводом конвейера, от скорости конвейерной ленты без регулирования скорости и с автоматическим регулированием

Fig. 2. The dependence of the change in true and reactive power consumed by the conveyor drive on the speed of the conveyor belt without speed control and with automatic control

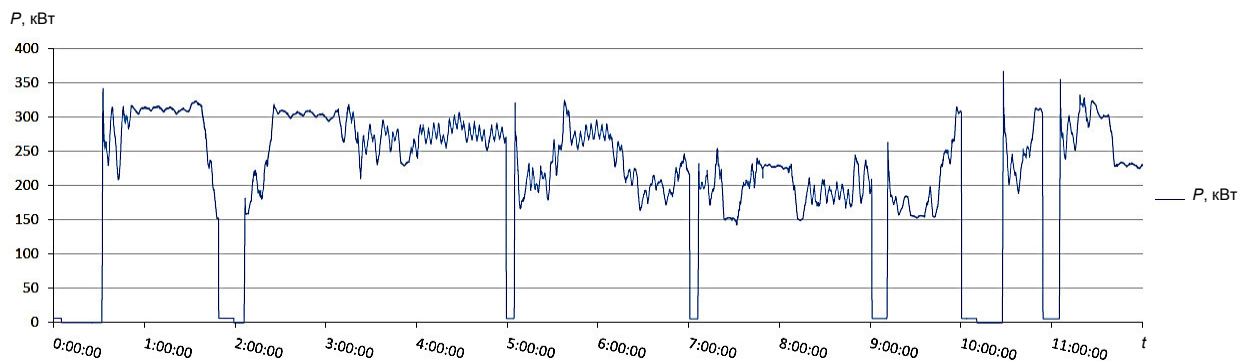


Рис. 3. Потребление активной мощности без регулирования скорости конвейерной ленты

Fig. 3. Active power consumption without speed control of the conveyor belt

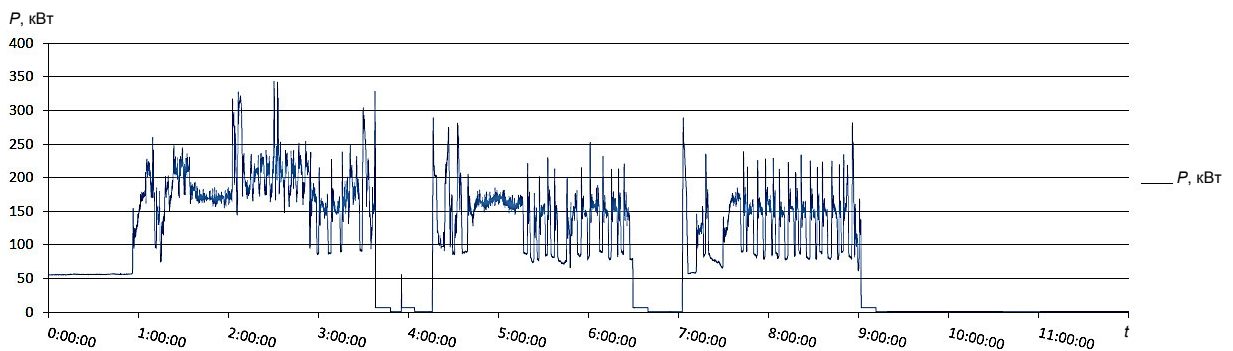


Рис. 4. Потребление активной мощности с регулируемой скоростью конвейерной ленты

Fig. 4. True power consumption with speed control of the conveyor belt

Таблица 1

Параметры работы конвейера

Table 1

Pipeline operation parameters

Параметры, характеризующие работу конвейера за период испытаний	Значение параметров	
	без ПЧ	с ПЧ
Среднее значение потребляемой активной мощности $P_{ср}$, кВт	174,85	138,99
Среднее значение потребляемой реактивной мощности $Q_{ср}$, кВАр	88,01	73,48
Удельное значение потребляемой активной энергии на тонну руды, кВт·час/т	0,441	0,206
Удельное значение потребляемой реактивной энергии на тонну руды, кВАр·час/т	0,222	0,109

Сопоставление фактических и расчетных значений k_n электроприемника выявило несоответствие справочных данных, приведенных в М788-1069/ВНИПИ «Тяжпромэлектропроект», фактическим значениям, полученным при проведении исследований:

- средняя величина – $k_n = 0,75$;
- фактическая величина без ПЧ – $k_n = 0,7$;
- фактическая величина с ПЧ – $k_n = 0,5$.

Анализируя эти значения, можно сделать вывод, что фактическая величина коэффициента использования ниже справочной на 5 %, а при использовании ПЧ – ниже на 25 %. Полученные данные доказывают необходимость корректировки утвержденного метода расчета нагрузок.

Исследования, проведенные на других технологических объектах, в частности на насосах, вентиляторах, кранах, и др., также показали большой энергетический эффект от использования преобразователей частоты; в процентном соотношении он может достигать

порядка 70 % в сравнении с режимом работы без регулирования скорости вращения технологического агрегата [14, 15].

Выводы

В статье приведено обоснование необходимости корректировки утвержденного метода по расчету электрических нагрузок с целью повышения точности, ибо эти значения оказывают влияние на технико-экономические показатели всего предприятия. Для снижения погрешности определения электрических нагрузок до приемлемых в инженерных расчетах значений необходимо учитывать влияние на каждый электроприемник в отдельности проводимых мероприятий по энергосбережению, в частности установки преобразователей частоты. Проведенные исследования подтверждали необходимость при проведении расчетов по существующему методу корректировать используемые коэффициенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жохов Б.Д.** Анализ причин завышения расчетных нагрузок и возможной их коррекции // Промышленная энергетика. 1989. № 7. С. 7–9.
2. **Степанов В.П., Лобанова О.В.** Прямой метод оценки числовых характеристик графиков электрической нагрузки // Изв. вузов. Электромеханика. 1996. № 3, 4. С. 101.
3. **Кротков Е.А., Степанов В.П.** Оценка погрешностей расчетных потерь электроэнергии в промышленных электрических сетях // Энергосбережение. 2000. № 3. С. 47–79.
4. **Синчук О.Н., Гузов Э.С., Пархоменко Р.А.** Совершенствование методов расчета электрических нагрузок при проектировании модернизации систем электроснабжения железорудных предприятий // Вестник КрНУ имени Михаила Остроградского. 2013. Вып. 1 (78). С. 28–32.



5. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок при оперативном управлении электроэнергетическими системами на основе нейросетевых структур. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2008.
6. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Веприков А.А., Хомяков К.А. Повышение эффективности электротехнических преобразовательных комплексов для питания электролизеров алюминия // Цветные металлы. 2016. № 10. С. 29–32.
7. Хомяков К.А., Беляков С.А. Применение энергосберегающих электродвигателей производства РИВС на объектах горно-обогатительного производства // Горный журнал. 2016. № 11. С. 107–108.
8. Волошко А.В., Лутчин Т.Н. Кластерный и вейвлет-анализ параметров энергопотребления // Вестник КДУ. 2010. № 1. С. 99–103.
9. Волошко А.В., Лутчин Т.Н. Разработка метода кластеризации вейвлет-преобразовательных графиков электрических нагрузок // Вестник НТУУ «КПИ». Серия «Гирництво». 2010. Вып. 19. С. 72–82.
10. Тавлинцев А.С., Суворов А.А., Стаймова Е.Д. Поиск однотипных графиков нагрузки энергообъекта // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. № 2. С. 20–27.
11. Devine M., Baring-Gould E.I. The Alaska village electric load calculator // NREL/TP-500-36824. October 2004.
12. Ilir Keka, Betim Cico, Neki Frasherri. Effect of parallelism in calculating the execution time during forecasting electrical load // JNTS. 2017. № 44. P. 169–180.
13. Bennett C., Stewart R.A., Lu J. Autoregressive with exogenous variables and neural network short-term load forecast models for residential low voltage distribution networks // Energies. 2014. No 7. P. 2938–2960.
14. Alasali F., Haben S., Becerra V., Holderbaum W. Optimal energy management and MPC strategies for electrified RTG cranes with energy storage systems // Energies. 2017. No 10. P. 1598–1616.
15. Ping-Huan Kuo, Chiou-Jye Huang. A high precision artificial neural networks model for short-term energy load forecasting // Energies. 2018. No 11. P. 213–226.
16. Khuntia S.R., Rueda J.L., Mart A.M.M., van der Meijden. Long-term electricity load forecasting considering volatility using multiplicative error model // Energies. 2018. No 11. P. 3308–3327.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ХОМЯКОВ Константин Алексеевич – аспирант Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: kostyhom@gmail.com

УСТИНОВ Денис Анатольевич – кандидат технических наук доцент Санкт-Петербургского горного университета

E-mail: bescheiden@rambler.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 28.01.2019

REFERENCES

- [1] Zhokhov B.D. Analiz prichin zavy'sheniya raschetny'kh nagruzok i vozmozhnoj ikh korrekczii. *Promy'shlennaya e'nergetika*. 1989. № 7. S. 7–9. (rus.)
- [2] Stepanov V.P., Lobanova O.V. Pryamoj metod ocenki chislovy'kh kharakteristik grafikov e'lektricheskoy nagruzki. *Izv. vuzov. E'lektromekhanika*. 1996. № 3, 4. S. 101. (rus.)
- [3] Krotkov E.A., Stepanov V.P. Ocenka pogreshnostej raschetny'kh poter' e'lektroe'nergii v promy'shlenny'kh e'lektricheskikh setyakh. *Energoberezhenie*. 2000. № 3. S. 47–79. (rus.)
- [4] Sinchuk O.N., Guzov E.S., Parkhomenko R.A. Sovershenstvovaniye metodov rascheta elektricheskikh nagruzok pri proyektirovanii modernizatsii sistem elektros-nabzheniya zhelezorudnykh predpriyatij. *Vestnik KrNU imeni Mikhaila Ostrogradskogo*. 2013. Vyp. 1 (78). S. 28–32. (rus.)
- [5] Shumilova G.P., Gotman N.E., Startseva T.B. Prognozirovaniye elektricheskikh nagruzok pri operativnom upravlenii elektroenergeticheskimi sistemami na osnove neyrosetevykh struktur. Yekaterinburg: Izd-vo UrO RAN, 2008. (rus.)
- [6] Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Veprikov A.A., Khomyakov K.A. Povysheniye effektivnosti elektrotekhnicheskikh preobrazovatelnykh kompleksov dlya pitaniya elektrolizerov alyuminiya. *Tsvetnyye metally*. 2016. № 10. S. 29–32. (rus.)

- [7] **Khomyakov K.A., Belyakov S.A.** Primeneniye energosberegayushchikh elektrodvigateley proizvodstva RIVS na obyektakh gorno-obogatitel'nogo proizvodstva. *Gornyy zhurnal*. 2016, №11, S. 107–108. (rus.)
- [8] **Voloshko A.V., Lutchin T.N.** Klasternyy i veyvlet-analiz parametrov energopotrebleniya. *Vestnik KDU*. 2010. № 1. S. 99–103. (rus.)
- [9] **Voloshko A.V., Lutchin T.N.** Razrabotka metoda klasterizatsii veyvlet-preobrazovatel'nykh grafikov elektricheskikh nagruzok. *Vestnik NTUU «KPI». Seriya «Girnitstvo»*. 2010. Vyp. 19. S. 72–82. (rus.)
- [10] **Tavlintsev A.S., Suvorov A.A., Staymova Ye.D.** Poisk odnotipnykh grafikov nagruzki energoobyekta, *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»*. 2018. T. 18. № 2. S. 20–27. (rus.)
- [11] **Devine M., Baring-Gould E.I.** The Alaska vil-lage electric load calculator. *NREL/TP-500-36824*. Oc-tober 2004.
- [12] **Ilir Keka, Betim Cico, Neki Frasheri.** Effect of par-allelism in calculating the execution time during forecasting electrical load. *JNTS*. 2017. № 44. P. 169–180.
- [13] **Bennett C., Stewart R.A., Lu J.** Autoregressive with exogenous variables and neural network short-term load forecast models for residential low voltage distribu-tion networks. *Energies*. 2014. No 7. P. 2938–2960.
- [14] **Alasali F., Haben S., Becerra V., Holderbaum W.** Optimal energy management and MPC strategies for electrified RTG cranes with energy storage systems. *En-ergies*. 2017. No 10. P. 1598–1616.
- [15] **Ping-Huan Kuo, Chiou-Jye Huang.** A high precision artificial neural networks model for short-term energy load forecasting. *Energies*. 2018. No 11. P. 213–226.
- [16] **Khuntia S.R., Rueda J.L., Mart A.M.M., van der Meijden.** Long-term electricity load forecasting considering volatility using multiplicative error model. *Energies*. 2018. No 11. P. 3308–3327.

THE AUTHORS

KHOMIAKOV Konstantin A. – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: kostyhom@gmail.com

USTINOV Denis A. – *Saint-Petersburg mining university*

E-mail: bescheiden@rambler.ru

Received: 28.01.2019