

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1310-1319

ANALYSIS OF THE CONNECTION OF ACTIVE AND REACTIVE ELECTRICAL LOADS OF LOAD-LIFTING MACHINES

O. M. Toloknova, A. V. Saushev, V. A. Shoshmin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

Possible valuation methods of a reactive load in the systems of electrical power supply of sea and river ports are considered and analyzed. It is shown that now only the method of calculation of the resistive electrical loads is rather reasonable. Reactive loads are evaluated according to the approximate formulas which are not connected to real process of energy consumption. The method of the decision of the task of more exact determination of the consumed reactive power by load-lifting machines on the example of portal easels is offered. The method is based on statistical modeling of electrical load of group of load-lifting machines, at the same time process of electricity consumption was considered as a random variable. The offered approach allows to increase the accuracy of assessment of a reactive load and to control more reasonably process of its compensating. At the same time requirements of a power supply system to the maximum and to a minimum of consuming of reactive power are fully fulfilled and penalties for exceeding of standards in different operation modes of load-lifting machines are excluded. Methods of prediction of process of consuming of electric power are considered. It is set that more and more widely for the purposes of prediction the intellectual methods providing high reliability of the forecast in different technological operation modes of customers of electrical energy find application. The conclusion is drawn on feasibility of prediction of electrical loadings of load-lifting machines by means of a neural network which is compatible to intellectual methods of management and provides significantly lower sensitivity of a forecasting accuracy in cases of lowering of autocorrelated communication of the load graph that has essential value for the analysis of energy consumption.

Keywords: reactive load, reactive power compensation, system of electrical power supply, calculation of loadings, load-lifting machines, statistical modeling, neural network.

For citation:

Toloknova, Olga M., Aleksandr V. Saushev, and Vladimir A. Shoshmin. "Analysis of the connection of active and reactive electrical loads of load-lifting machines." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1310–1319. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1310-1319.

УДК 621.316

АНАЛИЗ СВЯЗИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АКТИВНЫХ И РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

О. М. Толокнова, А. В. Саушев, В. А. Шошмин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Рассматриваются и анализируются возможные методы оценки реактивной нагрузки в системах электроснабжения морских и речных портов. Показано, что в настоящее время достаточно обоснован лишь метод расчета активных электрических нагрузок. Реактивные нагрузки оцениваются по приближенным формулам, не связанным с реальным процессом энергопотребления. Предложен метод решения задачи более точного определения потребляемой реактивной мощности грузоподъемными машинами на примере порталных кранов. Метод основан на статистическом моделировании электрической на-

грузки группы грузоподъемных машин, при этом процесс потребления электроэнергии рассматривался в качестве случайной величины. Предложенный подход позволяет повысить точность оценки реактивной нагрузки и более обоснованно управлять процессом ее компенсации. При этом в полной мере выполняются требования энергосистемы по максимуму и минимуму потребления реактивной мощности и исключаются штрафы за превышение нормативов в различных режимах работы грузоподъемных машин. Рассматриваются способы прогнозирования процесса потребления электрической мощности. Установлено, что все шире для целей прогнозирования находят применение интеллектуальные методы, обеспечивающие высокую достоверность прогноза в различных технологических режимах работы потребителей электрической энергии. Сделан вывод о целесообразности прогнозирования электрических нагрузок грузоподъемных машин с помощью нейронной сети, которая совместима с интеллектуальными методами управления и обеспечивает существенно более низкую чувствительность точности прогнозирования в случаях снижения автокорреляционной связи графика нагрузки, что имеет существенное значение для анализа энергопотребления.

Ключевые слова: реактивная нагрузка, компенсация реактивной мощности, система электроснабжения, расчет нагрузок, грузоподъемные машины, статистическое моделирование, нейронная сеть.

Для цитирования:

Толокнова О. М. Анализ связи и прогнозирование активных и реактивных электрических нагрузок грузоподъемных машин / О. М. Толокнова, А. В. Саушев, В. А. Шошмин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1310–1319. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1310-1319.

Введение

Одновременно с активной мощностью, совершающей полезную работу, в системах электроснабжения (СЭС) морских и речных портов присутствует и реактивная мощность, которая создает в электротехнических устройствах портовых перегрузочных машин электромагнитные поля, оказывающие влияние на их работу. Реактивные токи приводят к повышению потерь мощности в СЭС и электроприемниках. При больших мощностях протекание реактивного тока может привести к необходимости увеличения сечений кабельных линий и, как следствие, к увеличению капитальных затрат на создание СЭС. Одним из основных вопросов, решаемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения портов, является определение полной мощности и тока, потребляемых группой электрических приемников. Таким образом, оценка реактивной составляющей расчетных нагрузок является важной задачей при проектировании СЭС, а точность ее вычисления определяет степень энерго- и ресурсосбережения.

В работах [1], [2] показано, что между величинами активных P и реактивных Q нагрузок электроприемников промышленных предприятий не существует функциональной связи, которая предполагается в применяемых в настоящее время расчетах реактивных нагрузок. Там же отмечается, что эта связь стохастическая и может быть охарактеризована через основные моменты рассматриваемых случайных величин и коэффициенты корреляции между ними.

Оценка реактивной составляющей расчетных нагрузок в принятых к практической реализации методах, как правило, выполняется косвенно через активную мощность:

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi,$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент реактивной мощности. Значения этого коэффициента определяются на основе статистического анализа и приводятся в виде точечных оценок в специальных справочниках для отдельных групп электроприемников. Точность такой оценки невысока и в отдельных случаях может превышать лишь 10 % [3].

Известны и другие методы оценки реактивной нагрузки. Например, в работе [3] рассматривается метод, основанный на показателях индивидуальных и групповых графиков реактивной нагрузки электроприемников. Применение данных методов оценки расчетных пиков и впадин графиков электрической нагрузки подразумевает, что вид и параметры нормированных корреляционных функций индивидуальных графиков активной $P(t)$ и реактивной $Q(t)$ нагрузок являются одинаковыми, и все выражения, приведенные для оценки расчетных значений активной мощно-

сти, справедливы для оценки и реактивной мощности. Информационная база исходных данных при этом представляет собой характеристики индивидуальных графиков электрической нагрузки электроприемников: количество, номинальные мощности, коэффициенты использования и загрузки, вид и параметры трансформаторной подстанции.

Анализ, выполненный авторами при исследовании процесса электропотребления металлообрабатывающих станков на промышленных предприятиях, показал, что корреляционные функции индивидуальных графиков электрической нагрузки имеют различный вид и могут быть аппроксимированы экспоненциальными и экспоненциально-косинусными функциями. Методы экспериментального определения характеристик случайных графиков нагрузки рассмотрены в работе [4]. Для грузоподъемных машин, основу которых составляют краны, такой подход еще более оправдан, так как в отличие от общепромышленных электроприемников процесс потребления электроэнергии, например, портальными кранами сопровождается значительными колебаниями напряжения и режимами торможений (противовключение с отдачей энергии в сеть однофазное). Эти обстоятельства оказывают существенное влияние на соотношения между значениями Q и P . Таким образом, для выявления метода анализа величин реактивных нагрузок необходимо провести исследование, имеющее следующие цели:

- получить соотношения между средними крановыми нагрузками P_c и Q_c ;
- установить связи между среднеквадратичными отклонениями активной и реактивной нагрузок σ_P и σ_Q ;
- вычислить коэффициент корреляции между активной и реактивной нагрузками;
- проанализировать изменения рассмотренных величин при компенсации реактивной мощности;
- осуществить анализ методов прогнозирования электрических нагрузок.

Методы и материалы

Экспериментальное исследование активных и реактивных нагрузок грузоподъемных машин проводилось в АО «Морской порт Санкт-Петербург» для группы портальных кранов. Для моделирования групповых нагрузок был использован равномерный закон распределения. Принятие такого закона было обусловлено тем, что произвольные моменты включения каждого из электроприемников равновероятны. При этом графики нагрузки суммировались со случайным сдвигом. Величина такого сдвига при моделировании на компьютере определяется при помощи специальных функций, генерирующих случайные числа.

Используя для анализа связи между средними крановыми нагрузками P_c и Q_c коэффициент реактивной мощности $\operatorname{tg} \varphi_c$, были получены его значения для двух режимов работы кранов: перегрузка навалочных и перегрузка штучных грузов. Эти значения выражаются статистическими рядами, представленными в табл. 1.

Таблица 1

Статистические данные изменения коэффициента реактивной мощности

Перегрузка навалочных грузов											
$\operatorname{tg} \varphi_i$	1,21	1,25	1,29	1,33	1,37	1,45	1,49	1,53	1,57	1,61	1,65
n_i	17	31	20	16	14	8	3	6	3	4	9
Перегрузка штучных грузов											
$\operatorname{tg} \varphi_i$	1,6	1,66	1,72	1,78	1,84	1,9	1,96	2,02	2,08	2,14	$\operatorname{tg} \varphi_i$
n_i	10	20	45	29	15	8	15	20	8	3	n_i

Примечания: 1. $\overline{\operatorname{tg} \varphi} = 1,37$; $\hat{\sigma}_{\operatorname{tg} \varphi} = 0,13$ (для случая перегрузки навалочных грузов). 2. $\overline{\operatorname{tg} \varphi} = 1,845$; $\hat{\sigma}_{\operatorname{tg} \varphi} = 0,14$, где n_i — частота наблюдений; $\operatorname{tg} \varphi_i$ — коэффициент реактивной мощности; $\overline{\operatorname{tg} \varphi}$ — среднее значение коэффициента реактивной мощности; $\hat{\sigma}_{\operatorname{tg} \varphi}$ — среднеквадратичное отклонение коэффициента реактивной мощности (для случая перегрузки штучных грузов).

Для характеристики Q_i как случайной величины недостаточно знания только Q_c , определенного через значение $\operatorname{tg} \varphi$. Однако непосредственное определение и задание основного отклонения σ_Q следует признать нерациональным. Более правильным представляется способ его определения по значению σ_P . Поэтому при исследованиях была поставлена задача определить коэффициенты, связывающие эти две величины.

Как известно [3], указанные основные отклонения могут быть записаны следующим образом:

$$\sigma_P = \sqrt{P_s^2 - P_c^2} = P_c \sqrt{k_{\Phi P}^2 - 1};$$

$$\sigma_Q = \sqrt{Q_s^2 - Q_c^2} = Q_c \sqrt{k_{\Phi Q}^2 - 1},$$

где $k_{\Phi P}$; $k_{\Phi Q}$ — коэффициенты формы графиков, соответственно, активной и реактивной нагрузок.

Тогда

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_P} = \frac{Q_c \sqrt{k_{\Phi Q}^2 - 1}}{P_c \sqrt{k_{\Phi P}^2 - 1}} = \operatorname{tg} \varphi_c \sqrt{\frac{k_{\Phi Q}^2 - 1}{k_{\Phi P}^2 - 1}},$$

где значение $\operatorname{tg} \varphi_c$ было определено выше, а второй сомножитель может быть выражен через соответствующие вариации, так как $v = \sqrt{k_{\Phi}^2 - 1}$.

Тогда

$$\frac{\sigma_Q}{\sigma_P} = \operatorname{tg} \varphi_c \frac{v_Q}{v_P}.$$

Таким образом, исследование сводится к определению соотношения между вариациями графиков нагрузок.

Полученные экспериментальные материалы позволили составить следующие ряды распределения для случайной величины v_Q / v_P при различных вариантах перегрузки (табл. 2).

Таблица 2

Статистические данные изменения отношения вариаций реактивной и активной мощностей

Перегрузка навалочного груза												
v_Q/v_P	0,3	0,33	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,6	0,63
n_i	2	5	2	9	9	27	22	13	15	4	5	4
Перегрузка штучного груза												
v_Q/v_P	0,67	0,7	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,0
n_i	1	1	8	26	32	37	19	23	19	8	3	1

Примечания: 1. $\overline{v_Q/v_P} = 0,49$; $\hat{\sigma}_{v_Q/v_P} = 0,73$ (при перегрузке навалочного груза). 2. $\overline{v_Q/v_P} = 0,82$; $\hat{\sigma}_{v_Q/v_P} = 0,055$, где n_i — частота наблюдений; $\overline{v_Q/v_P}$ — среднее значение отношений вариаций реактивной и активной; $\hat{\sigma}_{v_Q/v_P}$ — среднеквадратичное отклонение вариаций нагрузок (реактивной и активной) при перегрузке штучного груза.

Обращает на себя внимание небольшое число вариации самих статистических рядов, что свидетельствует о малой изменчивости или устойчивости рассматриваемого признака. Этот вывод позволяет в дальнейшем рекомендовать для расчетов средние значения соотношений v_Q / v_P .

Для более полной и точной оценки взаимосвязи активной и реактивной мощностей, потребляемых порталными кранами, следует определить коэффициент корреляции, поскольку, как это показано [3], связь между ними является линейной и выражается уравнением первой степени.

Коэффициент корреляции между значениями переменных X и Y удобно рассчитывать по следующей формуле:

$$r_{XY} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{S_X S_Y} = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{S_X S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}},$$

где S_X, S_Y — оценка средних стандартных отклонений исследуемых переменных X и Y , в качестве которых в настоящей статье рассматриваются мгновенные значения активной и реактивной мощностей, потребляемых грузоподъемными машинами при их работе.

Эмпирический коэффициент корреляции r_{XY} — это выборочная оценка для истинного коэффициента корреляции ρ_{XY} , который является количественной мерой зависимости между изучаемыми величинами. Для решения вопроса о статистической значимости эмпирического коэффициента корреляции выдвигают нулевую гипотезу $H_0 (\rho_{XY} = 0)$, а затем проверяют, не противоречит ли она экспериментальным данным. В качестве критерия проверки значимости коэффициента корреляции r_{XY} для грузоподъемных машин может быть использована статистическая оценка, рассмотренная в работе [5]:

$$(T_{vq})_{\text{кр}} = r_{XY} \sqrt{N-2} / \sqrt{1-(r_{XY})^2}.$$

Величины T_{vq} имеют распределение Стьюдента. Их значения вычислены и табулированы по заданному уровню значимости q и числу степеней свободы: $\nu = N - 2$, где N — общее число наблюдений.

Коэффициент корреляции определялся по неосредненным реализациям графиков P и Q с помощью стандартной процедуры на ЭВМ. Вычисленные значения были сведены в следующие ряды распределения (табл. 3).

Таблица 3

Статистические данные изменения коэффициента корреляции

Для варианта перегрузки навалочного груза											
$r_{P,Q}$	0,38	0,41	0,44	0,47	0,5	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68
n_i	1	7	5	11	14	14	10	19	13	13	9
Для варианта перегрузки штучного груза											
$r_{P,Q}$	0,68	0,7	0,72	0,74	0,76	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86	
n_i	6	7	20	17	27	41	24	15	16	5	

Примечания: 1. $\overline{r_{P,Q}} = 0,575$; $\hat{\sigma} = 0,08$ (для перегрузки навалочного груза). 2. $\overline{r_{P,Q}} = 0,784$; $\hat{\sigma} = 0,098$, где n_i — частота наблюдений; $r_{P,Q}$ — коэффициент корреляции; $\overline{r_{P,Q}}$ — среднее значение коэффициента корреляции; $\hat{\sigma}$ — среднеквадратичное отклонение коэффициента корреляции (для перегрузки штучного груза).

Важнейшей задачей планирования и оперативного управления процессом энергопотребления является прогнозирование электрических нагрузок грузоподъемных машин. Достоверный прогноз позволяет выбирать оптимальные режимы работы системы электроснабжения, повышать ее экономичность и надёжность, управлять процессом компенсации реактивной мощности.

Известные методы прогнозирования электрических нагрузок различаются между собой как сложностью использования, объемом исходной информации, так и точностью конечного результата [5]. Наиболее широко в настоящее время применяются методы прогнозирования по среднему значению мощности за предыдущий интервал времени, статистические методы, а также интеллектуальные методы, основанные на использовании нейронных сетей [6] — [9].

Метод прогнозирования по среднему значению является самым простым. При его использовании вычисляется среднее значение исследуемой переменной на основании полученных значений на определенном интервале времени. Далее строится вектор прогнозных значений этой переменной, причем график данного прогноза представляет прямую линию.

Прогнозирование значений электрических нагрузок на основе статистических методов является в настоящее время одним из самых распространенных. Наиболее часто для целей прогнозирования используется экстраполяция данных [10]. В ее основу положено предположение о том, что рассматриваемый процесс имеет две составляющие: постоянную (линия тренда), которая представляет собой гладкую функцию от времени, и случайную некоррелированную составляющую с нулевым математическим ожиданием, оценка которой необходима для определения точностных характеристик прогноза. При этом упор делается на математическое описание тренда, основанного на анализе априорной информации, обеспечивающего наибольшую достоверность прогноза [5].

Методы прогнозирования на основе нейронных сетей являются относительно новыми и до конца не разработанными. Как известно, нейронная сеть — это эффективный метод имитации процессов и явлений, который позволяет воспроизводить очень сложные зависимости [11]. Основное отличие этого метода заключается в использовании процесса обучения, при котором задаются исходные данные, цели прогнозирования и автоматически определяются параметры самой сети [6]. Непосредственно нейронная сеть не прогнозирует будущее, она на основании априорной информации оценивает состояние исследуемой переменной в данный момент времени и «старается» воспроизвести его поведение в последующие моменты времени.

Результаты и обсуждение

Вычисленные средние значения коэффициента корреляции свидетельствуют о том, что особенности работы порталных кранов [4] оказывают значительное влияние на параметры нагрузок и подтверждают условность применяемого в настоящее время метода расчета реактивных нагрузок.

Таким образом, проведенное исследование позволило получить достаточно исчерпывающие характеристики для описания связи активных и реактивных нагрузок, создаваемых перегрузочными машинами. Однако ввиду того, что в портах широко применяется компенсация реактивной мощности, необходимо выяснить, как изменяются указанные характеристики при наличии компенсирующих устройств. С этой целью были проанализированы реализации графиков нагрузки P и Q при работе пятитонных кранов на навалочном грузе [3]. Исходные реализации характеризуются $\cos \varphi = 0,618$ и коэффициентом корреляции $r_{P,Q} = 0,697$.

При наличии постоянно включенного компенсирующего устройства для компенсации реактивной мощности до соответствующего значения $\cos \varphi$ изменится лишь Q_c , а остальные вероятностные характеристики останутся без изменений, поскольку вычитание постоянной величины из значений случайной величины не меняет основных моментов последней.

При наличии регулируемого компенсирующего устройства, поддерживающего $\cos \varphi$ на определенном уровне, вероятностные характеристики Q меняются. В этом случае случайные величины Q_i связываются со значениями P_i соотношением

$$Q_i = P_i \operatorname{tg} \varphi_n,$$

где $\operatorname{tg} \varphi_n$ — некоторая заданная величина, соответствующая желаемому значению $\cos \varphi_n$.

Следовательно, ряд распределения случайной величины получается из ряда распределения P_i путем умножения на некоторый постоянный коэффициент. Неизменными остаются лишь значения Q_i , соответствующие неравенству

$$\operatorname{tg} \varphi_i < \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Чем выше значение $\cos \varphi$, тем меньше количество неизменных Q_i и тем теснее связь активных и реактивных нагрузок. Очевидно, что в этом случае $v_Q = v_p$ и $\sigma_Q = \sigma_p \operatorname{tg} \varphi_n$.

Следовательно, при регулировании потребляемой реактивной мощности в функции $\cos \varphi$ основные параметры определяются как

$$Q_c = P_c \operatorname{tg} \varphi_n;$$

$$\sigma_Q = \sigma_p \operatorname{tg} \varphi_n.$$

Для значений $\cos \varphi = 0,9 - 0,92$ можно считать $r_{p,Q} \approx 1$.

При компенсации реактивной мощности на порталных кранах компенсирующее устройство присоединяется к контакторам двигателей подъема, мощность которых составляет более 80 % от общей установленной мощности крана. Включение и отключение компенсирующего устройства происходит одновременно с включением и отключением двигателей подъема. Поэтому в первом приближении можно считать, что кран оборудован регулируемым компенсирующим устройством, и применить полученные ранее выводы к этому случаю.

Анализ электрических нагрузок грузоподъемных машин позволяет сделать следующие выводы относительно перспектив использования рассмотренных методов прогнозирования для случайного процесса изменения реактивной мощности с нормальным законом распределения.

Прогнозирование по среднему значению является наименее точным во всем диапазоне изменений параметров автокорреляционной функции, т. е. прогноз реактивных нагрузок является наиболее неэффективным среди рассматриваемых методов. Он может быть использован для прогнозирования графиков нагрузки, для которых отсутствует автокорреляционная связь (при значениях коэффициента затухания автокорреляционной функции более 10,0 1/с). Для грузоподъемных машин, работающих, как правило, в интенсивном повторно-продолжительном режиме, такие режимы встречаются крайне редко.

Прогнозирование с помощью статистических методов характеризуется достаточно малой погрешностью при небольших величинах коэффициента затухания автокорреляционной функции, порядка 10^{-3} 1/с. При росте коэффициента затухания погрешность прогнозирования нелинейно возрастает. Эти методы отличает простота использования и небольшие временные затраты на их практическую реализацию [12].

Прогнозирование с помощью нейронной сети является наиболее эффективным методом для исследования электрических нагрузок грузоподъемных машин. При этом значение коэффициента затухания корреляционной функции должно быть в диапазоне $(2 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-1})$ 1/с. Это соответствует случаям плавно изменяющихся графиков нагрузки, когда имеет место автокорреляционная связь [13]. Преимуществом прогнозирования электрических нагрузок с помощью нейронной сети является их совместимость с интеллектуальными методами управления [14], [15], а также существенно более низкая чувствительность точности прогнозирования в случаях снижения автокорреляционной связи графика нагрузки, что имеет существенное значение для анализа энергопотребления грузоподъемных машин [7].

Полученные результаты согласуются с результатами работ [6] по исследованию точности прогнозирования реактивных нагрузок металлообрабатывающих станков и моделированию графика потребления реактивной мощности на компьютере в программной среде Matlab в предположении нормального закона распределения и использования экспоненциально-косинусной корреляционной функции.

Выводы

1. Между активными и реактивными нагрузками существует стохастическая связь, приближающаяся к функциональной тем ближе, чем выше уровень управляемой компенсации реактивной мощности.
2. Вычисленные средние значения статистических коэффициентов: коэффициента корреляции, среднеквадратичного отклонения реактивной нагрузки, коэффициента реактивной мощно-

сти для различных вариантов перегрузки груза, показали значительное влияние технологических факторов на параметры нагрузок порталных кранов.

3. Для прогнозирования электрических нагрузок грузоподъемных машин, электроприводы которых работают, как правило, в интенсивном повторно-кратковременном режиме работы, перспективным представляется использование теории нейронных сетей, обеспечивающей получение достоверных и устойчивых результатов при циклическом и сложном характере технологических процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко. — М.: Электроатомиздат, 1985. — 224 с.
2. Савина Н. В. Прогнозирование реактивной мощности узлов нагрузки для оптимальной компенсации реактивной мощности в условиях неопределенности / Н. В. Савина, А. А. Казакул // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2012. — № 2 (61). — С. 92–99.
3. Шошмин В. А. Использование статистических характеристик электрических нагрузок порталных кранов для расчета электрических сетей портов / В. А. Шошмин // Электрификация и автоматизация водного транспорта: сб. тр. молодых научных работников. — Л.: ЛИВТ, 1975. — 134 с.
4. Толокнова О. М. Исследование электропотребления перегрузочными машинами / О. М. Толокнова, Л. М. Бровцинова, В. А. Шошмин // Сб. науч. тр. по материалам Международной научно-практической конференции «Наука и образование в жизни современного общества» 30.04. 2015 г. — Тамбов: ООО Консалтинговая компания «Юком», 2015. — Т. 8. — С. 40–42.
5. Саушев А. В. Планирование эксперимента в электротехнике / А. В. Саушев. — СПб.: СПбГУВК, 2012. — 273 с.
6. Саенко Ю. Л. Анализ методов прогнозирования реактивных нагрузок промышленных предприятий / Ю. Л. Саенко, В. В. Любарцев // Вестник Приазовского государственного технического университета. — 2015. — № 30 (2). — С. 129–137.
7. Манусов В. З. Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами / В. З. Манусов, Е. В. Бирюков // Известия Томского политехнического университета. — 2006. — Т. 309. — № 6. — С. 153–157.
8. Tushar W. Prioritizing consumers in smart grid: A game theoretic approach / W. Tushar, J. A. Zhang, D. B. Smith, H. V. Poor, S. Thiebaut // IEEE Transactions on Smart Grid. — 2014. — Vol. 5. — Is. 3. — Pp. 1429–1438. DOI: 10.1109/TSG.2013.2293755.
9. Varaiya P. P. Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch / P. P. Varaiya, F. F. Wu, J. W. Bialek // Proceedings of the IEEE. — 2011. — Vol. 99. — Is. 1. — Pp. 40–57. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2080250.
10. Степанов В. П. Анализ автокорреляционных функций графиков активной и реактивной нагрузки металлообрабатывающих станков / В. П. Степанов, А. В. Гудков, Ю. С. Смирнова, К. С. Аверьянова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. — 2014. — № 3. — С. 28–30.
11. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2006. — 1104 с.
12. Фролов В. Я. Графики активной и реактивной нагрузки бытовых потребителей / В. Я. Фролов, А. В. Коротков // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. — 2011. — № 5. — С. 29–31.
13. Кронгауз Д. Э. Методы и средства регулирования активной и реактивной мощности в городской электрической сети / Д. Э. Кронгауз // Промышленная энергетика. — 2011. — № 3. — С. 45–48.
14. Саушев А. В. Прогнозирование состояния электротехнических систем на основе информационных технологий / А. В. Саушев, К. К. Гаспарян // Международный научно-исследовательский журнал. — 2015. — № 7-1 (38). — С. 93–95.
15. Gao F. A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation / F. Gao, M. R. Iravani // IEEE Transactions on Power Delivery. — 2008. — Vol. 23. — Is. 2. — Pp. 850–859. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.915950.

REFERENCES

1. Zhelezko, Yu. S. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti i povyshenie kachestva elektroenergii*. M.: Elektroatomizdat, 1985.
2. Savina, Natalya, and Aleksei Kazakul. "Prediction of reactive power of load nodes for the optimal compensation of reactive power under uncertainty." *Proceedings of Irkutsk State Technical University* 2(61) (2012): 92–99.
3. Shoshmin, V. A. "Ispol'zovanie statisticheskikh kharakteristik elektricheskikh nagruzok portal'nykh kranov dlya rascheta elektricheskikh setei portov." *Elektrifikatsiya i avtomatizatsiya vodnogo transporta: sb. trudov molodykh nauchnykh rabotnikov*. L.: Izd-vo LIVTa, 1975.
4. Toloknova, O. M., L. M. Brovtsinova, and V. A. Shoshmin. "Issledovanie elektropotrebleniya peregruzochnymi mashinami." *Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauka i obrazovanie v zhizni sovremennogo obshchestva» 30.04. 2015 g.: T. 8*. Tambov: OOO Konsaltingovaya kompaniya «Yukom», 2015: 40–42.
5. Saushev, A. V. *Planirovanie eksperimenta v elektrotekhnike*. SPb.: S.-Peterb. gos. un-t vodnykh kommunikasiy, 2012.
6. Saenko, Yu. L., and V. V. Lyubartsev. "Analiz metodov prognozirovaniya reaktivnykh nagruzok promyshlennykh predpriyatii." *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 30(2) (2015): 129–137.
7. Manusov, V.Z., and E.V. Biriukov. "Short-term load prediction on the basis of fuzzy neural network and its comparison with other methods." *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University* 309.6 (2006): 153–157.
8. Tushar, Wayes, J.A. Zhang, D.B. Smith, H.V. Poor, and S. Thiebaux. "Prioritizing consumers in smart grid: A game theoretic approach." *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.3 (2014): 1429–1438. DOI: 10.1109/TSG.2013.2293755.
9. Varaiya, Pravin P., Felix F. Wu, and Janusz W. Bialek. "Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch." *Proceedings of the IEEE* 99.1 (2011): 40–57. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2080250.
10. Stepanov, V.P., A.V. Gudkov, Yu.S. Smirnova, and K.S. Aver'yanova. "Analiz avtokorrelyatsionnykh funktsii grafikov aktivnoi i reaktivnoi nagruzki metalloobrabatyvayushchikh stankov." *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika* 3 (2014): 28–30.
11. Khaikin, S. *Neironnye seti: polnyi kurs*. M.: Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2006.
12. Frolov, V.Ya., and A.V. Korotkov. "Grafiki aktivnoi i reaktivnoi nagruzki bytovykh potrebitelei." *Vestnik ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* 5 (2011): 29–31.
13. Krongauz, D. E. "Metody i sredstva regulirovaniya aktivnoi i reaktivnoi moshchnosti v gorodskoi elektricheskoi seti." *Promyshlennaya energetika* 3 (2011): 45–48.
14. Saushev, A.V., and K.K. Gasparyan. "Forecasting of the condition of electrotechnical systems on the basis of information technologies." *International Research Journal* 7-1(38) (2015): 93–95.
15. Gao, Fang, and M. Reza Iravani. "A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation." *IEEE Transactions on Power Delivery* 23.2 (2008): 850–859. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.915950.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Толокнова Ольга Михайловна —
 старший преподаватель
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
 адмирала С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: olga_toloknova@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Саушев Александр Васильевич —
 доктор технических наук, профессор
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
 С. О. Макарова»
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
 ул. Двинская, 5/7
 e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Toloknova, Olga M. —
 Senior lecturer
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: olga_toloknova@mail.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru
Saushev, Aleksandr V. —
 Dr. of Technical Sciences, professor
 Admiral Makarov State University of Maritime
 and Inland Shipping
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
 Russian Federation
 e-mail: saushev@bk.ru, SaushevAV@gumrf.ru

Шошмин Владимир Александрович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: vshoshmin@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

Shoshmin, Vladimir A. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: vshoshmin@yandex.ru,
kaf_electroprivod@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 7 ноября 2017 г.
Received: November 7, 2017.*