

# ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЛАНИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ, ПОДЛЕЖАЩИЕ МОДЕЛИРОВАНИЮ И АВТОМАТИЗАЦИИ

## ECONOMIC ASPECTS OF GAS TURBINE CAPACITY PLANNING THAT ARE SUBJECT TO MODELLING AND AUTOMATION

**M. Sadovskiy  
E. Mustakaeva**

*Summary.* The article deals with the necessity of precise generation volumes forecasting to optimize costs, increase profit and ensure sustainable operation of a generating company. The research in the field of electric power industry economics and forecasting methods of the gas turbine capacity is analysed. The necessity of designing an information system which integrates data on forecasted weather conditions with operating parameters of SGT-800 gas turbine was justified. The economic efficiency of the automated control system implementation includes reduction of losses from irrational gas turbine's operating modes, optimisation of the generation volume and profit increase by means of the forecast accuracy improvement. It is found that optimisation of the capacity request size requires the probability distribution function analysis and taking into account the normal distribution of deviations to maximise revenue and minimise penalties.

*Keywords:* generation volume forecasting, gas turbine capacity, modelling and automation in production process management, economic efficiency of information system design, informatization, generating company.

**Садовский Максим Константинович**

Инженер-технолог,  
Филиал «Невский» ПАО «ТЭК-1» (Санкт-Петербург)  
i@maxim-sadovskiy.ru

**Мустакаева Екатерина Александровна**

Кандидат экономических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Государственный университет морского  
и речного флота имени адмирала С.О. Макарова»  
(Санкт-Петербург)  
e@mustakaeva.ru

*Аннотация.* В статье рассматривается необходимость точного прогнозирования объемов генерации для оптимизации затрат, повышения доходов и обеспечения устойчивого функционирования генерирующей организации. Проанализированы исследования в области экономики электроэнергетики и методов прогнозирования мощности газотурбинных установок. Обоснована необходимость проектирования информационной системы, интегрирующей данные о прогнозируемых погодных условиях с операционными параметрами газотурбинной установки SGT-800. Экономическая эффективность внедрения автоматизированной системы управления заключается в снижении потерь от нерациональных рабочих режимов газотурбинной установки, оптимизации объема генерации и увеличении доходов за счет повышения точности прогнозов. Установлено, что оптимизация размера заявки на мощность требует анализа функции вероятностного распределения мощности и учета нормального распределения отклонений для максимизации выручки и минимизации штрафов.

*Ключевые слова:* прогнозирование объемов генерации, мощность газотурбинной установки, моделирование и автоматизация при управлении производственными процессами, экономическая эффективность проектирования информационной системы, информатизация, генерирующая организация.

Электроэнергетика играет ключевую роль в экономике России, и включает в себя экономические отношения, возникающие в процессе производства, передачи, оперативно-диспетчерского управления, сбыта и потребления электрической энергии с использованием производственных и других имущественных объектов субъектов электроэнергетики. Процесс генерации мощности в генерирующей организации включает сжигание топлива для нагрева воды, производства пара, вращения турбины и генерации электроэнергии. Экономические аспекты необходимости повышения точности определения объемов генерации турбиной включают оптимизацию затрат на топливо, улучшение планирования технического обслуживания, максимизации доходов и снижение эксплуатационных расходов, а также управление рисками и соблюдение экологических норм. Актуальность задачи по прогнозированию объемов ге-

нерируемой мощности обусловлена необходимостью обеспечения устойчивого и эффективного функционирования генерирующей организации, удовлетворения потребностей потребителей и развития энергетической системы в целом.

Неотъемлемой частью эффективного управления организацией является информатизация, способствующая сбору и анализу больших объемов данных, включая прогнозы погоды и параметры работы турбины, значительно повышающая точность прогнозов генерации мощности. Внедрение автоматизированных систем снижает вероятность ошибок, связанных с человеческим фактором, и позволяет быстро реагировать на изменения, обеспечивая гибкость и оперативность в управлении производственными процессами.

Вклад в развитие системных исследований в области экономики электроэнергетики и развитии методов и моделей прогнозирования мощности электроэнергии во взаимосвязи с экономикой внесли работы сборника под редакцией Мелентьева Л.А. и Беляева Л.С. [13]. В статьях [12], [7] рассматриваются современные методы оптимизации и повышения эффективности газотурбинных установок (ГТУ). Анализ факторов влияющих на работу газовых турбин посвящены исследования [5–7]. Научные исследования и разработки продолжают активно развиваться, предлагая новые методы и подходы для повышения точности и надежности прогнозов, включая методы машинного обучения (нейронные сети) и искусственного интеллекта [17, 14, 10]. В работе [11] рассмотрены современные подходы к управлению и автоматизации работы ГТУ. Исследованиям экономической эффективности энергосистем, в том числе ГТУ, а также вопросам оптимизации затрат и повышения рентабельности генерирующих предприятий посвящены работы В.В. Барановского, Т.Ю. Короткова [9], Д.А. Андреева [8], Г.С. Сапрыкина [16], В.С. Самсонова, М.А. Вяткина [15].

На генерирующих предприятиях непрерывно развивается производственно-техническая база, осуществляемая в формах нового строительства, реконструкции, расширения и технического перевооружения. Совершенствуются технологические процессы, разрабатываются новые технические решения по анализу и прогнозированию мощности генерирующего оборудования, развивается информационное и техническое сопровождение данных процессов, а также предназначенные для этих целей автоматизированные информационные системы (АИС), разрабатываются и внедряются новые программные средства и оборудование для автоматизации процессов. Повышение рентабельности деятельности генерирующей организации может быть обеспечено при условии внедрения технических решений, повышающих точность планирования генерируемой мощности и её доходность за счет обеспечения планового объема генерации. Ключевым фактором, влияющими на доходы и экономическую эффективность работы генерирующего предприятия, является точное определение планируемой мощности при оформлении заявки. В этой связи, в основе повышения экономической эффективности генерирующего предприятия ставится задача эффективного планирования генерируемой мощности и обеспечения запланированных объемов поставки электроэнергии на оптовый рынок электрической мощности (ОРЭМ).

Динамика генерации электроэнергии в ГТУ нарушается действием различных случайных факторов (климатических условий), но отклонения от основного технологического процесса имеют свои закономерности. Более точное прогнозирование генерируемой на станции мощности электроэнергии является основой для принятия

решений при управлении организацией. Оно необходимо как в процессе планирования нормальных электрических режимов генерирующего оборудования, так и для обеспечения контрактных обязательств с контрагентами на ОРЭМ. Некорректные данные по прогнозу погоды при планировании и осуществлении коммерческой деятельности генерирующей организации, ведут к прямому изменению накладных затрат, направленных на оплату ущерба от отклонения объемов фактически поставленной электроэнергии на ОРЭМ. Согласно правилам [2] ОРЭМ потребители электрической энергии обязаны корректно планировать генерируемую мощность, а другие участники ОРЭМ берут на себя ответственность за объемы генерации и поставки электроэнергии. Объем поставки, который вышел за рамки установленного в соответствии с прогнозом (отклонение в генерации от установленного значения), влечет к дополнительным расходам генерирующей организации.

Между тем, формирование прогнозных оценок высокой точности и принятие на их основе обоснованных управленческих решений возможно только в случае комплексного подхода и информатизации. Комплексность подхода может быть обеспечена разработкой автоматизированной информационной системы (АИС), включающей моделирование работы турбины на основе актуальных параметров прогноза погоды и прогнозирование генерируемой мощности. Такая АИС должна интегрировать данные о текущих и прогнозируемых погодных условиях с операционными параметрами ГТУ, обеспечивая точное и своевременное определение объемов генерации. Это позволит не только улучшить точность прогнозов, но и повысить оперативность принятия управленческих решений, что в свою очередь оптимизирует использование ресурсов и снизит эксплуатационные расходы. Таким образом, комплексный подход с использованием АИС способствует повышению эффективности работы генерирующего предприятия и увеличению его доходов.

Экономическая эффективность использования АИС основывается на следующих факторах:

- снижение потерь от нерациональных рабочих режимов ГТУ;
- достижение оптимального (рационального) объема генерации с учетом заявленной мощности;
- снижение потерь от неточного прогноза погоды за счет недопоставленной электроэнергии (прямое снижение накладных затрат);
- повышение уровня дохода на основе увеличения объемов выработки за счет повышения точности прогноза.

Основной экономический эффект проектных решений по разработке АИС прогнозирования мощности ГТУ реализуется за счет увеличения объемов выработ-

ки, основанного на повышении точности прогноза и как следствие повышения уровня дохода при реализации большего объема мощности и (или) уменьшении ущерба, возникающего при сокращении по сравнению с заявленной мощностью. Показатель неготовности генерирующего оборудования, определяемый способностью к выработке электроэнергии генерирующего оборудования участника ОРЭМ в расчетном месяце, рассчитывается для каждой ГТУ по формуле, учитывающей коэффициенты, определяемые Правилами оптового рынка [2].

Возвращаясь к вопросу необходимости повышения точности прогноза, значения которого имеют стохастический характер, выявлено, что обоснование оптимизации мощности ГТУ, указываемого в заявке, в условиях неопределенности прогноза погоды включает несколько ключевых аспектов: анализ прогноза, неопределенность и распределение отклонений, влияние климатических факторов на мощность эксплуатируемой турбины SGT-800.

Проведя ретроспективный анализ определен фактический разброс отклонения прогноза погоды на примере температуры, представленный на Рис. 1.

Прогноз погоды имеет тенденцию к увеличению разброса вероятного отклонения по мере увеличения временного горизонта. Этот разброс можно описать нормальным распределением с растущей дисперсией прогнозируемых значений с увеличением горизонта прогноза. Данное явление известно, как *расширение диапазона неопределенности прогноза*, которое наблюдается во многих областях, включая климатические и экономические прогнозы. Таким образом, стандартное отклонение ошибки прогноза (или другие меры неопределенности) увеличивается по мере увеличения временного интервала.

Разброс температуры относительно прогнозируемых значений можно аппроксимировать нормальным распределением (формула 1):

$$\Delta T \sim N(0, \sigma^2) \tag{1}$$

где  $\Delta T$  — отклонение фактической температуры от прогнозируемой;  $N(0, \sigma^2)$  — нормальное распределение с нулевым средним и дисперсией.

Проведен анализ влияния климатических факторов на мощность турбины. Мощность, которую может генерировать ГТУ, отрицательно коррелирует с температурой. Это означает, что с увеличением температуры мощность снижается. Математически эта зависимость может быть представлена как:

$$N(T) = N_{\max} + k \cdot T \tag{2}$$

где  $N(T)$  — мощность при температуре  $T$ , °C;  $N_{\max}$  — максимальная мощность при условиях ISO;

$$ISO = \{t = 15^\circ\text{C}, p = 1013 \text{ гПа}, h = 60 \%\} \text{ [3, с.1]}$$

$k$  — коэффициент уменьшения мощности на единицу температуры.

Статистический анализ данных работы ГТУ позволил выявить более сложную функцию нескольких переменных для прогноза мощности [МВт]:

$$N = f(\rho, p, h, t) = c_0 + c_\rho \cdot \rho + c_p \cdot p + c_h \cdot h + c_t \cdot t \tag{3}$$

где  $\rho$  — плотность воздуха  $\left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\right]$ ,  $p$  — атмосферное давление [Па],  $h$  — влажность воздуха [доля],  $t$  — температура воздуха [°C];

$c_0, c_\rho, c_p, c_h, c_t$  — коэффициенты линейного смещения, плотности, давления, влажности, температуры.

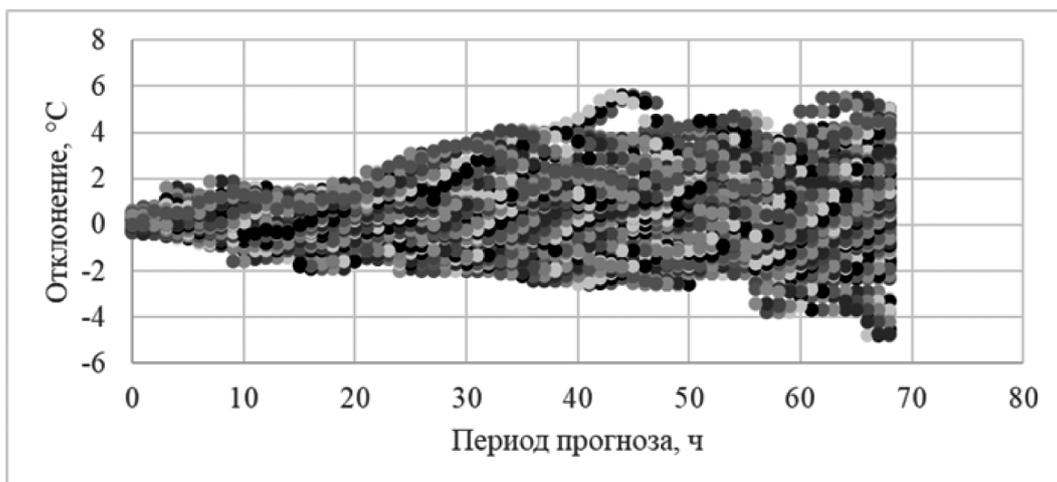


Рис. 1. Разброс вероятного отклонения прогноза погоды

Точность прогноза и оперативное управление заявками играют ключевую роль в минимизации штрафов и увеличении совокупного дохода генерирующей организации. Следовательно, необходимо провести анализ и оптимизацию дохода от выработки, так как этот аспект является наиболее подверженным влиянию со стороны управления и прогнозирования. Обратим внимание на особенности установленного нормативными актам [1, 2, 18] порядка определения выручки от продажи энергии генерирующей организации.

Размер *совокупной выручки от основной деятельности* генерирующей организации ( $D_T$ ), определяется двумя статьями доходов по двум тарифам: плата за мощность и плата за выработку (формула 4).

$$D_T = D_p + D_G \quad (4)$$

где  $D_T$  — совокупной доход генерирующего предприятия от продажи электроэнергии;  $D_p$  — доход от продажи электроэнергии, определяемой по мощности;  $D_G$  — доход от продажи электроэнергии, определяемой по выработки (генерации).

Опишем *зависимость дохода от мощности ГТУ*. Механизм расчета платы за мощность можно описать формулой (5).

$$D_p = c_p \cdot N \quad (5)$$

где  $D_p$  — доход от продажи электроэнергии, определяемой по мощности;  $c_p$  — тариф за единицу мощности.

Доход от продажи электроэнергии, определяемой по мощности ( $D_p$ ), линейно зависит от вырабатываемой мощности и фиксированной цены (тарифа). Повышение эффективности управления организацией не влияет на изменение данного показателя, поэтому выходит за рамки исследования в настоящей работе.

Опишем *зависимость дохода от выработки ГТУ*. При определении размера дохода от выработки ГТУ учитывается как размер заявленной мощности, так и внесенные в разные интервалы времени изменения в заявки, с возможным последующем возмещением ущерба за отклонение от заявленных значений в виде штрафа из-за недостоверного прогноза.

При подаче заявки на мощность необходимо учитывать штрафы за недопоставку и упущенную выгоду. Если заявленная за месяц мощность ( $N_{\text{план_месяц}}$ ) превышает плановую за 2 дня ( $N_{\text{план_2дня}}$ ) более чем на 2 %, то генерирующая компания платит штраф с коэффициентом  $\alpha$ , который составляет 1,075.

*Штраф за недопоставку* рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{штраф1}} = 1.075 \cdot (N_{\text{план_месяц}} - N_{\text{план_2дня}}) \quad (6)$$

где  $N_{\text{план_месяц}}$  — заявленная за месяц мощность;  $N_{\text{план_2дня}}$  — заявленная за 2 дня мощность.

*Условие 1:*

$$N_{\text{план_2дня}} \cdot 0.98 > N_{\text{факт}} \quad (7)$$

где  $N_{\text{факт}}$  — фактическая мощность ГТУ.

При выполнении условия 1 к штрафу за недопоставку  $N_{\text{штраф1}}$  добавляется штраф с коэффициентом 1,5:

$$N_{\text{штраф2}} = N_{\text{штраф1}} + 1.5 \cdot (N_{\text{план_2дня}} - N_{\text{факт}}) \quad (8)$$

где  $N_{\text{штраф2}}$  — общая сумма штрафа при выполнении условия 1.

Таким образом, доход за мощность определяется по формуле:

*Сумма дохода за мощность* составляет:

$$D_G = (N_{\text{план_месяц}} - N_{\text{штраф}} \cdot k_{\text{диф}}) \cdot c_G \cdot k_{\text{сез}} \quad (9)$$

где  $k_{\text{диф}}$  — дифференцированный коэффициент;  $k_{\text{сез}}$  — коэффициент сезонности;  $c_G$  — тариф за единицу мощности, поставляемой на ОРЭМ.

Если заявленная мощность меньше возможной, генерирующая организация теряет *потенциальную прибыль*:

$$\text{Упущенная выгода} = c_G \cdot (N_{\text{факт}} - N_{\text{план_месяц}}) \quad (10)$$

Определим *оптимальный размер заявки*. График зависимости прибыли от заявленной мощности представлен на Рис. 2.

Оптимизация размера заявки заключается в нахождении такого значения  $N_{\text{план_2дня}}$ , при которой разница между ожидаемой выручкой и штрафами максимальна. Формально, это задача максимизации следующей целевой функции:

$$D_T - N_{\text{штраф2}} \rightarrow \max \quad (11)$$

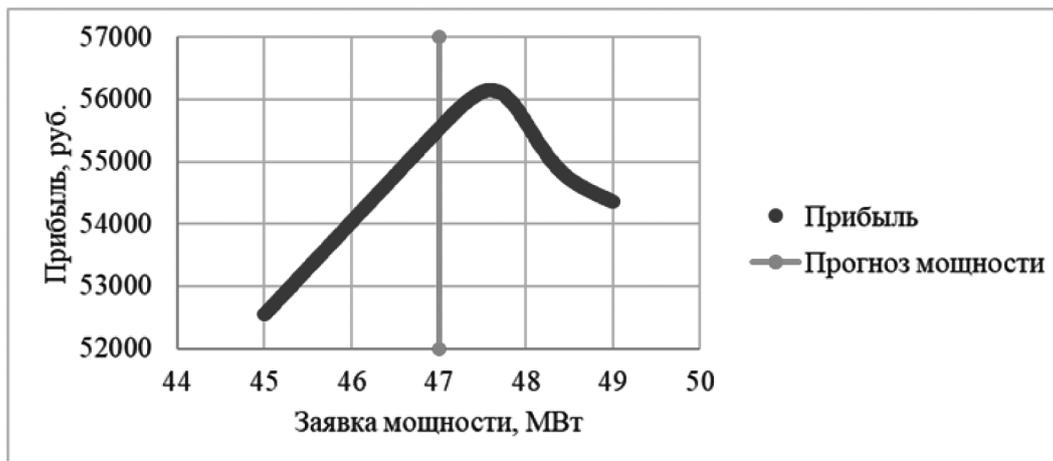


Рис. 2. График зависимости прибыли от заявленной мощности

С учетом нормального распределения отклонений задача сводится к анализу функции вероятностного распределения мощности и оптимального выбора  $N_{\text{планмесяц}}$  и  $N_{\text{план2дня}}$ .

Дальнейшие исследования необходимо осуществлять в направлении проектирование автоматизированной системы управления энергокомплексом на базе ГТУ и описания методологии оценки экономической эффективности локальных технических решений в области информатизации на генерирующем предприятии.

### Выводы

Проведен анализ исследований в области экономики электроэнергетики и методов прогнозирования мощности электроэнергии, включая работы по оптимизации и автоматизации газотурбинных установок.

Установлено, что генерирующие предприятия непрерывно развивают производственно-техническую базу, внедряя новые технологии и АИС для повышения точности планирования и генерации мощности, которая является ключевым фактором для повышения экономической эффективности, минимизации эксплуатационных затрат и штрафов за невыполнение договорных обязательств.

Уточнена необходимость повышения точности прогнозирования мощности ГТУ для минимизации штрафов и увеличения доходов генерирующих организаций, поскольку ошибки в прогнозах ведут к значительным финансовым потерям.

На основе прогнозов погоды, имеющих стохастический характер вероятности и увеличивающуюся дисперсию с увеличением временного горизонта, определена необходимость использования сложных моделей для прогнозирования. Определено, что для обеспечения точного и своевременного определения объемов генерации необходим комплексный подход. Обоснована необходимость проектирования автоматизированной информационной системы, интегрирующей данные о прогнозируемых погодных условиях с текущими и прогнозируемыми операционными параметрами ГТУ.

Экономическая эффективность внедрения АИС основывается на снижении потерь от нерациональных рабочих режимов, оптимизации объема генерации, уменьшении ущерба от неточного прогноза погоды и увеличении доходов за счет повышения точности прогнозов и объемов выработки. Установлено, что оптимизация размера заявки на мощность требует анализа функции вероятностного распределения мощности и учета нормального распределения отклонений, что позволяет максимально увеличить выручку и минимизировать штрафы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Федеральный закон от 26.03.2003 «Об электроэнергетике» № 35-ФЗ.
2. Постановление Правительства РФ от 27 декабря 2010 г. N 1172 «Об утверждении Правил оптового рынка электрической энергии и мощности и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам организации функционирования оптового рынка электрической энергии и мощности».
3. ГОСТ Р 52200-2004. Установки газотурбинные. / М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. 4 с.
4. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance / Li Y.G., Nilkitsaranont P. // Appl. Energy. 2009. № 86-10. P. 2152–2161. DOI 10.1016/j.apenergy.2009.02.011.
5. Parameter selection for diagnosing a gas-turbine's performance-deterioration / S.O.T. Ogaji, S. Sampath, R. Singh, S.D. Probert // Appl. Energy. 2002. № 73–1. P. 25–46. DOI 10.1016/S0306-2619(02)00042-9.

6. Siemens AG. "SGT-800 Industrial Gas Turbine." Siemens Energy Sector, 2022.
7. Аминов Р.З., Кожевников А.И. Оптимизация режимов работы газотурбинной электростанции с учетом влияния износа оборудования // Теплоэнергетика. — 2017. — № 10. — С. 17–24. — DOI 10.1134/S0040363617100010. — EDN WRKBHC.
8. Андреев Дмитрий Алексеевич. Эффективность газотурбинных и парогазовых ТЭЦ малой мощности: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.14.01. — Саратов, 1999. — 18 с.
9. Барановский В.В., Короткова Т.Ю. Техно-экономическое обоснование создания тепловых электрических станций: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. — СПб., 2018. Часть 1. — 29 с.
10. Блинов В.Л., Дерябин Г.А. Применение методов машинного обучения при эксплуатации газотурбинных установок в системе транспорта газа // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Сборник трудов XV Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 26 апреля 2022 года. — М: Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2022. — С. 183–193. — EDN ZLAGRD.
11. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Исследование нелинейных алгоритмов управления газотурбинными установками // Современные проблемы науки и образования. — 2015. — № 2-2. — С. 162. — EDN UZJAEV.]
12. Котов А.С., Сивеев Т.М., Груздов А.Г. Обзор методов прогнозирования генерации энергии // Столыпинский вестник. — 2022. — Т. 4, № 9. — С. 12–13. — EDN SWMQQK.
13. Методы математического моделирования в энергетике: (Темат. сборник работ) / АН СССР. Сиб. отд-ние. Сиб. энерг. ин-т; [Отв. ред. чл.-кор. АН СССР Л.А. Мелентьев и канд. техн. наук Л. С. Беляев]. — [Иркутск]: Вост.-Сиб. кн. изд-во, 1966. — 432 с.
14. Самигулина Г.А. Разработка интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе искусственных иммунных систем // Теоретическая информатика. — 2009. — Вып. 4. — С. 15–22.
15. Самсонов В.С., Вяткин М.А., Экономика предприятий энергетического комплекса: Учебник. — Издательство: «Высшая школа», — 2003. — 416 с.
16. Сапрыкин Г.С., Житаренко В.М. Эффективность газотурбинных ТЭЦ в энергосистемах // Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки. — 2014. — № 28. — С. 100–105. — EDN THGFHZ.
17. Шумилова Г.П., Готман Н.Э., Старцева Т.Б. Прогнозирование электрических нагрузок с применением методов искусственного интеллекта — [Электронный документ] URL: <http://www.energy.komisc.ru/seminar/StShum1.pdf>. (дата обращения 12.12.2015).
18. Регламент определения объемов фактически поставленной на оптовый рынок мощности с изменениями от 22 июня 2022 года / Протокол № 10/2022 заседания Наблюдательного совета Ассоциации «НП Совет рынка», Приложение № 13 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка — [Электронный документ] URL: <https://www.np-sr.ru/ru/regulation/joining/reglaments/1976> (дата обращения 12.06.2024).

© Садовский Максим Константинович (i@maxim-sadovskiy.ru); Мустакаева Екатерина Александровна (e@mustakaeva.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»