

УДК 007.51

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-96-102

Управление процессом энергопотребления предприятия

Н.В. Устюгов, О.М. Проталинский

Работа посвящена анализу решений, принимаемых в энергетической системе предприятия при управлении потреблением электрической энергии. Учитывая международный рост спроса на электрическую энергию и системное повышение стоимости энергоресурса, предмет изучения актуален.

Исследование проведено на действующем предприятии, рассматриваемом в качестве организационно-технической системы. На нем определены границы предметной области и типы энергетических инженерных сооружений. Выполнена декомпозиция системы на подсистемы с выделением применяемых организационных и технических управляющих воздействий. Сформулирована задача управления электропотреблением с учетом минимизации финансовых расходов и найдено её решение для одного элемента. Дан алгоритм определения оптимального воздействия в системе, предлагающий решение с учетом заданного критерия (финансовых расходов на оплату потребленной электроэнергии) и ограничений (функциональности прототипа и бюджета для оплаты энергии). Алгоритм проверяет управляющие воздействия на самом продолжительном жизненном цикле системы — эксплуатации.

Разработана структура системы поддержки принятия решения (СППР) для управления электропотреблением элемента. Она определяет последовательность действий при нанесении управляющих воздействий с дальнейшей проверкой принятых решений. Проведены экспериментальные исследования на элементе системы, которые показали практическую применимость и финансовую экономию, что свидетельствует о возможности дальнейшего применения результатов исследования в энергетических системах предприятий всех уровней.

Ключевые слова: энергетическая система, электрическое потребление, минимизация финансовых расходов, функциональность, алгоритм принятия решения.

Для цитирования: Устюгов Н.В., Проталинский О.М. Управление процессом энергопотребления предприятия // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 96—102. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-96-102.

Managing the Enterprise Power Consumption Process

N.V. Ustyugov, O.M. Protalinskiy

Decisions made adopted in an enterprise power system in managing the electric energy consumption are analyzed. The urgency of the subject matter is stemming from the global-wide growth in the demand for electric energy and a systemic increase in the cost of energy resources. The study was carried out at an operating enterprise considered as an organizational and technical system. The subject area boundaries and the types of power engineering structures are determined at the enterprise. The system was decomposed into subsystems with identifying the applied organizational and technical managing/control actions. The power consumption management problem is formulated taking into account the minimization of financial costs, and its solution is found for one element. An algorithm for determining the optimal measure to be taken in the system is proposed, which offers a solution taking into account the specified criterion (financial expenditures for consumed electricity) and constraints (prototype functionality and energy payment budget). The algorithm checks the control actions in the course of system operation, which is the system lifecycle longest part. The structure of the decision making support system for managing the power consumption of an element is developed. The structure determines the sequence of measures to be taken in applying control actions with subsequently verifying the decisions made. Experimental studies were carried out on a system element, which that have demonstrated the practical applicability and financial savings, thereby testifying the possibility of further application of the study results in the power systems of enterprises belonging to all levels.

Key words: power system, electricity consumption, minimization of financial expenditures, functionality, decision-making algorithm.

For citation: Ustyugov N.V., Protalinskiy O.M. Managing the Enterprise Power Consumption Process. Bulletin of MPEI. 2021;3:96—102. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-96-102.

Введение

Энергопотребление — основная статья расходов предприятия, поэтому управление потреблением электрической энергии, направленное на минимизацию финансовых расходов, — актуальная задача.

При эксплуатации систем электроснабжения является потребностью в системе поддержки принятия оптимального решения (СППР). Предметом исследования становится электропотребление в организационно-технической системе [1] на примере государственного

бюджетного учреждения по ремонту и эксплуатации инженерных сооружений «Гормост», г. Москва (далее — предприятие). В его оперативном управлении находится 1693 инженерных объекта, из которых электрифицированы 869 (потребление в год — 121 млн кВт).

Электроэнергия на объекты подаётся от трансформаторных подстанций электросетевых компаний города, в единичных случаях — от иных юридических лиц. Расчеты за потребленную электроэнергию осуществляются с энергосбытовой компанией. Граница

предметной области со стороны электросетевых компаний включает в себя трансформаторные подстанции 0,4 кВ — на 827 объектах и 10 кВ — на 42 объектах. Граница соответствует актам технологического присоединения и служит разграничением балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности между предприятием и сетевыми компаниями. Со стороны электропотребителей она включает в себя различные технологические системы и оборудование, необходимое для городской инфраструктуры.

Мировая тенденция в вопросе управления электропотреблением ведет к принятию нормативных документов и реализации программ [2 — 4], позволяющих абоненту системно, долгосрочно и экономически выгодно планировать потребление электрической энергии [5 — 7]. Из этого следует, что тема оптимального управления электрическим потреблением в энергетической системе востребована и перспективна [8 — 10].

Цель работы — разработка алгоритма принятия решения в процессе электропотребления предприятия, направленного на минимизацию финансовых расходов и обеспечение функциональности, предоставляемой энергетической системой.

Предприятие, как объект исследования, — сложная иерархическая структура, которая может быть декомпозирована в соответствии с целевым и функциональным назначениями на подсистемы нижнего уровня (рис. 1): подземные и надземные пешеходные переходы, мосты, тоннели малой протяженности, административные здания (объекты до 670 кВт), фонтаны и тоннели большой протяженности (свыше 670 кВт).

Подсистемы имеют общие признаки: назначение объектов, структуру инженерных систем и типы электропотребителей, взаимосвязанность по отношению к системе. Элементы подсистем, как объекты управления, рассматриваются с позиции потребления электроэнергии.

Постановка задачи

Критерием оптимальности являются финансовые расходы на оплату потребленной электрической энергии $J_{п.э} : J_{п.э} \rightarrow \Sigma_{\min \text{э}}, J_{п.э} \rightarrow C_{\text{э} \min}$, где $\Sigma_{\min \text{э}}$ — суммарное минимальное электропотребление; $C_{\text{э} \min}$ — минимальная стоимость электроэнергии.

Основные параметры (или ограничения) энергетической системы:

- функциональность E_{ϕ} , позволяющая поддерживать работоспособным каждый элемент и избежать незапланированных расходов, $E_{\phi} \geq \Sigma_{\min \text{э}}$;

- бюджет $E_{\text{б}}$, выделяемый для оплаты потребленной электрической энергии $\Sigma_{\max \text{э}} \leq E_{\text{б}}$, где $\Sigma_{\max \text{э}}$ — суммарное максимальное электропотребление.

Следовательно, ограничениями являются обеспечение функциональности системы и неперевышение запланированного бюджета.

Задача оптимального управления заключается в минимизации финансовых расходов при потреблении электрической энергии на этапе эксплуатации элемента организационно-технической системы.

Задача выполнима при применении управляющих воздействий (табл. 1), оказываемых на инженерный объект (или элемент системы).

В анализируемой системе воздействия могут быть разделены на два типа в соответствии со способом нанесения: организационные (создающие изменения в договорных отношениях между физическими и юридическими лицами) и технические (связанные с проведением работ).

Решение задачи исследования

Разработан алгоритм определения оптимального воздействия на этапе эксплуатации энергетической системы предприятия (рис. 2), выбранном с учетом практической необходимости и по итогам анализа временной продолжительности жизненных циклов сооружения.

В алгоритм введены исходные данные, необходимые для определения оптимального воздействия: архивное потребление объекта за все время работы электроустановки (минимум за один предыдущий календарный год); бюджет, запланированный на оплату энергии в среднесрочной перспективе (до года); структура f и \bar{a} параметры инженерного сооружения; управляющее воздействие.

Выполнена привязка элемента к одной из семи подсистем. Это необходимо для сбора статистических данных и анализа принимаемых решений на разных типах сооружений.

Для параллельных вычислений информация распределена по модулям: плано-предупредительному, текущему и капитальному ремонтам (мероприятия входят в этап эксплуатации объекта), функциональ-



Рис. 1. Декомпозиция объекта исследования

Организационные и технические управляющие воздействия

Подсистема или тип инженерного сооружения	Организационное воздействие	Техническое воздействие
Подземные пешеходные переходы	Изменение ценовой категории и тарифа на услуги по передаче электроэнергии	Применение светодиодных светильников; использование трансформаторов тока и счетчиков с максимальным межповерочным интервалом — 16 лет;
Надземные пешеходные переходы		
Мосты		
Тоннели малой протяженности (до 125 м)		
Административные здания		
Фонтаны	Расчет по уровню напряжения; расчет перехода объекта на оптовый рынок электрической энергии и мощности; изменение ценовой категории и тарифа на услуги по передаче электроэнергии; изменение профиля мощности	Применение светодиодных светильников; использование трансформаторов тока и счетчиков с максимальным межповерочным интервалом — 16 лет; применение электрооборудования (насосов, вентиляторов, электрических печей и т. д.) с классом энергоэффективности А
Тоннели большой протяженности		

ности элемента. Рассчитаны минимальное и максимальное электропотребления в элементе, подсистеме и системе при условии выполнения планируемых работ (например, замене трансформаторов тока). Проведено сравнение результатов решения с первым ограничением (бюджетом) и критерием (потреблением электроэнергии). В завершении цикла функциональности определены функции, необходимые городской инфраструктуре, исполнение которых обеспечивает работа элемента, подсистемы и системы. Сделана сверка результатов параллельных вычислений со вторым ограничением (функциональностью). Если итог сверки не соответствует хотя бы одному из заданных требований, то вычисление завершается с последующими предложениями корректировки исходных данных элемента и повторного прохождения процедуры вычисления. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут результат, соответствующий заданному критерию и двум ограничениям.

Алгоритм определения оптимального решения стал основой для разработки и применения на предприятии СППР для управления электропотреблением инженерного объекта (рис. 3).

На первом уровне СППР идет планирование процесса выбора оптимального решения по одному из воздействий.

Первый уровень включает пять операций:

- постановку цели (которая должна быть достигнута благодаря нанесению управляющего воздействия) и задач руководства или лица, принимающего решение;
- формирование типа решения, выбор одного из нескольких возможных;
- определение контекста решения, выбор для инженерного объекта (элемента) в масштабах предприятия (системы);

- анализ архивной информации о ранее примененных управляющих воздействиях и полученных результатах.

На втором уровне выполняются сбор исходных данных, которыми располагает абонент, и запрос недостающей информации у гарантирующего поставщика.

Для последующих вычислений необходимы шесть параметров:

- критерий оптимальности (минимальная стоимость электроэнергии);
- функциональность элемента, необходимая системе и обществу;
- бюджет, выделяемый на реализацию воздействия;
- планируемые потребления электроэнергии \mathcal{E}_n и мощности M_n ;
- суммарное минимальное и максимальное электропотребление;
- стоимость технологического присоединения (или планируемых работ) по рассматриваемым вариантам;
- необходимое количество дохода электросетевой компании за гарантированное электроснабжение;
- затраты, связанные с потерями в электрических сетях, понесенные во время передачи энергии абоненту;
- архивное электропотребление элемента.

С наступлением третьего уровня реализуются следующие операции:

- расчет по математическим моделям управляющих воздействий [11];
- определение минимального тарифа за передачу электроэнергии и ее стоимость;
- сверка бюджета с предлагаемой стоимостью технологических присоединений или запланированных работ;
- сопоставление результата с ограничениями и критерием;

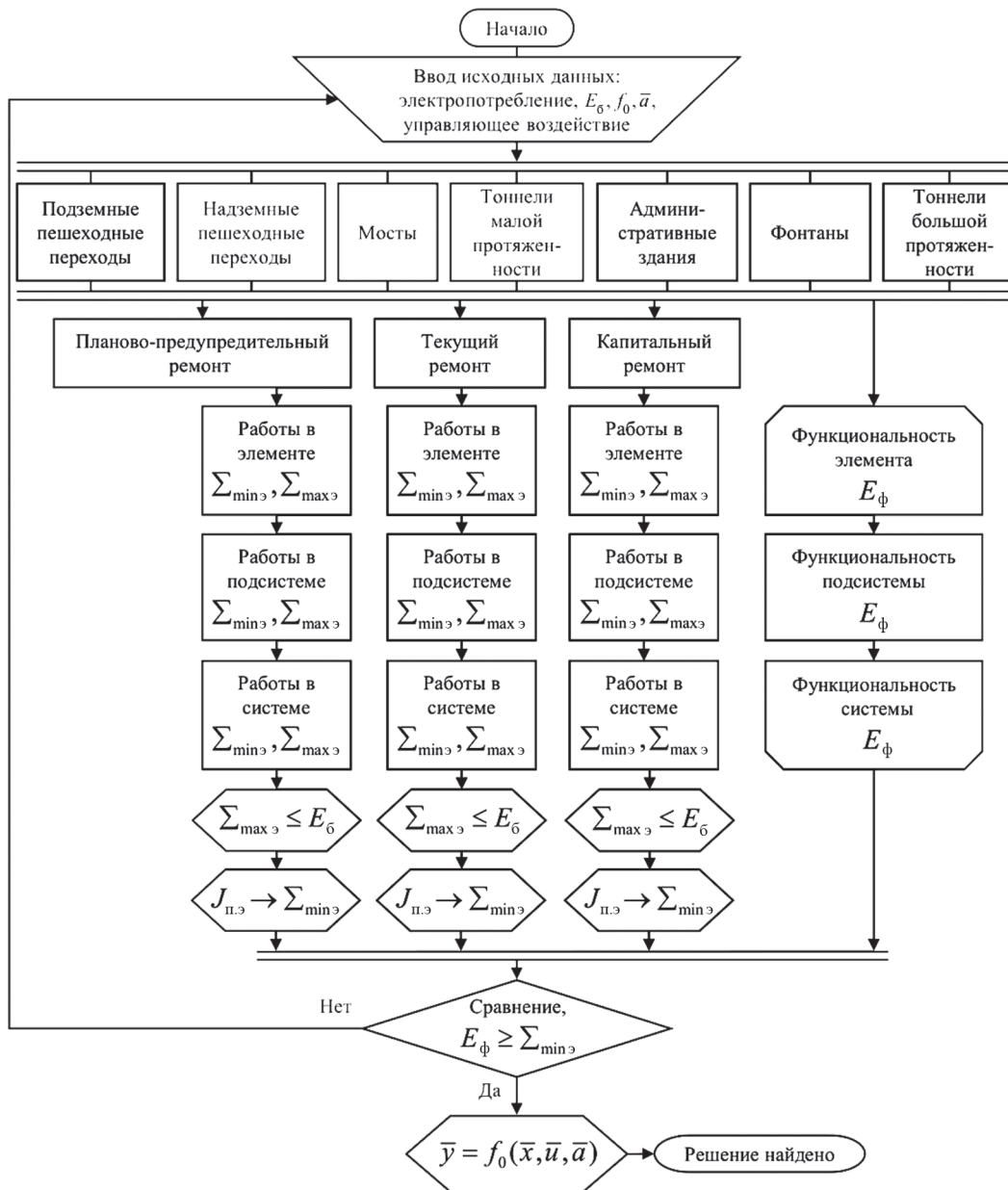


Рис. 2. Алгоритм определения оптимального воздействия

При несовпадении итогового результата хотя бы с одним из сравнений абоненту предлагается перейти к первому уровню СППР и пройти процедуру принятия решения повторно с учетом полученного рассогласования.

При соответствии результата всем сравнениям оптимальное решение определено, т. е. на основе выбранного решения составляется прогноз электропотребления и часов пиковой нагрузки в регионе и организовывается управление профилем мощности.

Четвертый уровень — принятие и реализация решения. Несмотря на практическую объемность и продолжительность данного периода, в нем выделяются две основные операции: выбор оптимальных техни-

ко-экономических параметров, на основе ранее выполненных операций, инвестирование и выполнение запланированных решений.

Конечным уровнем выступает проверка принятых решений. Она состоит из операций:

- сбора внутренних технико-экономических данных после реализации выбранного решения (или нанесения управляющего воздействия);
- сравнения предварительных расчетов с реальной экономией на электропотреблении.

Если принятое решение на практике недостаточно выгодно, то выполняется экспертная оценка с выявлением и устранением причин. Если апробация под-

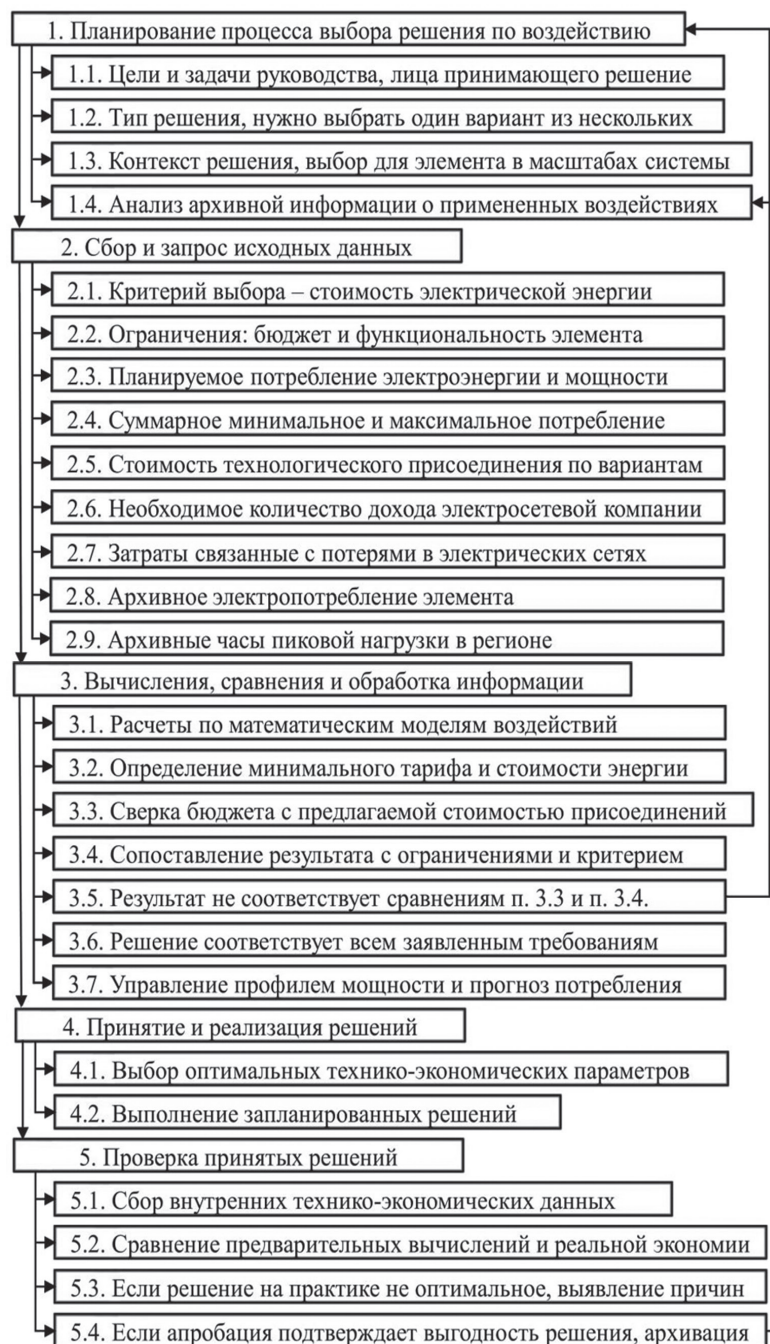


Рис. 3. Структура СППР управления электропотреблением элемента

тверждает предварительные вычисления, то принятое решение сохраняется в архиве как эталонное.

По рассмотренному алгоритму и структуре СППР на примере фонтана «Дружба народов» (элемент) сделаны вычисления планируемой экономии от применения предложенных воздействий (табл. 2).

Для решения задачи исследования выбрана подсистема «фонтаны», на которую распространяется влияние всех организационных и технических действий.

Результаты вычисления показывают минимизацию финансовых расходов от реализации предлагаемых управляющих схем на этапе эксплуатации энергетиче-

ской системы предприятия. Планируемая экономия для оставшихся шести подсистем — аналогична с учетом функций элемента и объема электропотребления.

Выводы и результаты

Исследован существующий подход определения управленческих решений в процессе электропотребления предприятия, направленный на минимизацию финансовых расходов. Предложены управляющие воздействия, алгоритм определения оптимального воздействия (учитывающий функциональность системы, выделяемый бюджет и минимизацию финансовых расходов на опла-

Планируемая экономия в месяц от управляющих воздействия

Описание воздействия	Расходы, руб.		Планируемая экономия, мес./руб.
	фактические	планируемые	
Расчет по уровню напряжения	290893,9	242753,4	48140,5
Расчет перехода объекта на оптовый рынок электрической энергии и мощности	290893,9	63920,8	226973,1
Изменение ценовой категории и тарифа на услуги по передаче электроэнергии, выбор из 3 или 4	34907,3	31657,1	3250,2
Смена профиля мощности	7536,4	3318,6	4217,8
Применение светодиодных светильников	12544	5018	7526
Использование трансформаторов тока с межповерочным интервалом 16 лет	3172,8	973,8	2199
Применение счетчиков с межповерочным интервалом 16 лет	28,2	2,82	25,38
Использование энергооборудования с классом энергоэффективности А	6557,4	1502,7	5054,7
Итоговая планируемая экономия финансовых средств на одном объекте в месяц без учета 1 и 2 воздействия (всего 869 объектов)			22273,08

ту потребленной электрической энергии) и структура СППР, управляющая электропотреблением элемента. Полученные результаты применимы при разработке программного обеспечения, которое, на основе исходных данных, автоматически определяет итоговые показатели энергетической системы предприятия и предлагает оптимальное решение, паритетное заданным требованиям.

Литература

1. Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами. М.: Либроком, 2009.
2. Fercu M. e. a. Mehr Energieeffizienz Durch Gezielte Anwenderinformationen: Bundesamt für Energie BRE [Электрон. ресурс] <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22132025> (Дата обращения 24.12.2020).
3. Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation [Электрон. ресурс] www.springer.com/de/book/9783658247591 (Дата обращения 04.11.2020).
4. Energieeffizienz und Energiemanagement [Электрон. ресурс] www.springer.com/de/book/9783834819413 (Дата обращения 04.11.2020).
5. Automatisierung auf Neuem Niveau [Электрон. ресурс] www.automationnet.de/automatisierung (Дата обращения 20.02.2020).
6. Fachkonferenz für Industrielle Automatisierung [Электрон. ресурс] www.automationnet.de/fachkonferenz-fuer-industrielle-automatisierung-am-16-17-mai-81764 (Дата обращения 20.02.2020).
7. Vernetzte Möglichkeiten [Электрон. ресурс] www.automationnet.de/vernetzte-mo-eglichkeiten-82185 (Дата обращения 20.02.2020).
8. Offenheit als Prinzip [Электрон. ресурс] www.automationnet.de/of-fenheit-als-prinzip-85840 (Дата обращения 20.02.2020).

Поставлен эксперимент на основе энергетической системы элемента (фонтан «Дружба народов»), изменены ценовая категория (с первой на третью) и профиль мощности оборудования, что привело к экономии (в ноябре 2019 г. — 7468 руб.), а статья расходов «оплата потребленной электроэнергии» уменьшилась на 2,56% (задача управления решена).

References

1. Burkov V.N., Korgin N.A., Novikov D.A. Vvedenie v Teoriyu Upravleniya Organizatsionnymi Sistemami. M.: Librokom, 2009. (in Russian).
2. Fercu M. e. a. Mehr Energieeffizienz Durch Gezielte Anwenderinformationen: Bundesamt für Energie BRE [Elektron. Resurs] <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22132025> (Data Obrashcheniya 24.12.2020).
3. Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation [Elektron. Resurs] www.springer.com/de/book/9783658247591 (Data Obrashcheniya 04.11.2020).
4. Energieeffizienz und Energiemanagement [Elektron. Resurs] www.springer.com/de/book/9783834819413 (Data Obrashcheniya 04.11.2020).
5. Automatisierung auf Neuem Niveau [Elektron. Resurs] www.automationnet.de/automatisierung (Data Obrashcheniya 20.02.2020).
6. Fachkonferenz für Industrielle Automatisierung [Elektron. Resurs] www.automationnet.de/fachkonferenz-fuer-industrielle-automatisierung-am-16-17-mai-81764 (Data Obrashcheniya 20.02.2020).
7. Vernetzte Möglichkeiten [Elektron. Resurs] www.automationnet.de/vernetzte-mo-eglichkeiten-82185 (Data Obrashcheniya 20.02.2020).
8. Offenheit als Prinzip [Elektron. Resurs] www.automationnet.de/of-fenheit-als-prinzip-85840 (Data Obrashcheniya 20.02.2020).

9. **Energiemanagement** [Электрон. ресурс] www.springer.com/de/book/9783658028336 (Дата обращения 20.02.2020).

10. **IT-gestütztes Ressourcen und Energiemanagement** [Электрон. ресурс] www.springer.com/de/book/9783642342350290 (Дата обращения 04.11.2020).

11. **Балакирев В.С., Дворецкий С.И., Аниськина Н.Н.** Математическое моделирование технологических процессов. Ярославль: Издат. дом Н.П. Пастухова, 2018.

9. **Energiemanagement** [Elektron. Resurs] www.springer.com/de/book/9783658028336 (Data Obrashcheniya 20.02.2020).

10. **IT-gestütztes Ressourcen und Energiemanagement** [Elektron. Resurs] www.springer.com/de/book/9783642342350290 (Data Obrashcheniya 04.11.2020).

11. **Balakirev V.S., Dvoretzkiy S.I., Anis'kina N.N.** Matematicheskoe modelirovanie Tekhnologicheskikh Protessov. Yaroslavl': Izdat. Dom N.P. Pastukhova, 2018. (in Russian).

Сведения об авторах:

Устюгов Никита Викторович — аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: UstyugovNV@dom.mos.ru

Проталинский Олег Мирославович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами НИУ «МЭИ», e-mail: Protalinskiy@gmail.com

Information about authors:

Ustyugov Nikita V. — Ph.D-student of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: UstyugovNV@dom.mos.ru

Protalinsky Oleg M. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Automated Control Systems for Thermal Processes Dept., NRU MPEI, e-mail: Protalinskiy@gmail.com

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 27.01.2020

The article received to the editor: 27.01.2020