

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА УПРАВЛЕНЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ УЧРЕЖДЕНИЯ

*Н. В. Устюгов, О. М. Проталинский*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
Москва, Российская Федерация*

Цель исследования: разработать и апробировать алгоритм выбора управленческого решения в энергетической системе. Приведены типы управленческих решений, принимаемых в учреждении при потреблении электрической энергии. Произведена декомпозиция системы на подсистемы с выделением применяемых оптимальных организационных и технических управляющих воздействий. Представлены модели подсистем с последующей агрегацией в единую структуру модели энергетической системы. Предложен алгоритм определения оптимального управленческого решения в энергетической системе, который проверяет решения с учетом заданного критерия и ограничений. Сформулирована задача управления электропотреблением, учитывающая минимизацию финансовых расходов, и найдено ее решение в рамках одной подсистемы. Проведены экспериментальные исследования, которые показали практическую применимость разработанного алгоритма и финансовую экономию от его применения, что свидетельствует о возможности дальнейшего использования результатов исследования в энергетических системах предприятий Российской Федерации и за рубежом.

**Ключевые слова:** алгоритм выбора управленческого решения, энергетическая система учреждения, потребление электроэнергии, минимизация финансовых расходов, функциональность, бюджет.

**Для цитирования:** Устюгов Н. В., Проталинский О. М. Алгоритм выбора управленческого решения в энергетической системе учреждения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2020. № 4. С. 62–69. DOI: 10.24143/2072-9502-2020-4-62-69.

### Введение

Энергопотребление является одной из основных статей расходов учреждения, поэтому управление потреблением электрической энергии, ориентированное на минимизацию финансовых расходов, является актуальной задачей. При эксплуатации систем электроснабжения появляется потребность в алгоритме определения оптимального управленческого решения.

Объектом исследования является энергетическая система [1], на примере государственного бюджетного учреждения по ремонту и эксплуатации инженерных сооружений «Гормост» (г. Москва). На 2019 г. в оперативном управлении учреждения находилось 1 693 инженерных сооружения, из которых электрифицированы 869 с электропотреблением – 121 млн кВт в год. Электрическая энергия на объекты подается 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, трансформаторные подстанции 10 кВ на 42 объектах. Данная граница соответствует актам технологического присоединения и является разграничением балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности между учреждением и сетевыми организациями. Граница предметной области со стороны электропотребителей включает в себя различные технологические системы и оборудование, которое необходимо для городской инфраструктуры.

Мировая тенденция в вопросе управления электропотреблением предполагает принятие нормативных документов и реализацию программ, которые позволяют абоненту принимать системные, долгосрочные и экономически выгодные решения [2, 3]. Из этого следует, что тема оптимального управления электрическим потреблением в энергетической системе является востребованной и перспективной [4–6].

Целью работы является разработка алгоритма выбора управленческого решения в энергетической системе. Идеология алгоритма должна быть направлена на минимизацию финансовых затрат и обеспечение функциональности, которая предоставляется системой. Учреждение как объект исследования является сложной иерархической структурой, которая может быть декомпозирована в соответствии с целевым и функциональным назначением на подсистемы нижнего уровня (рис. 1): подземные пешеходные переходы, надземные пешеходные переходы, мосты, тоннели малой протяженности, административные здания (объекты до 670 кВт), фонтаны и тоннели большой протяженности (объекты свыше 670 кВт).



Рис. 1. Декомпозиция объекта исследования

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

### Постановка задачи

Критерием выбора управленческого решения являются финансовые расходы, направляемые на оплату потребленной электрической энергии ( $J_{\text{пэ}}$ ). Основные параметры системы, позволяющие управлять инженерными сооружениями: функциональность системы, которая позволяет поддерживать работоспособным каждый элемент и избегать незапланированных расходов; бюджет, который выделяется для оплаты электрической энергии. Следовательно, ограничениями являются обеспечение функциональности системы и неперевышение бюджета.

*Задача оптимального управления:* минимизация финансовых расходов при потреблении электрической энергии на этапе эксплуатации функциональной энергетической системы, где  $\bar{x}(t_0)$  – входные данные на этапе априори, электрическое потребление (в кВт·ч) за расчетный период (1 календарный месяц);  $\bar{y}(t_0)$  – выходные данные, стоимость (в руб.) потребленной электрической энергии за расчетный период;  $\bar{x}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1})$  и  $\bar{y}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1})$  – входные и выходные данные в режиме реального времени;  $\bar{u}(t_0)$  и  $\bar{u}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1})$  – управляющие воздействия;  $f_0$  – структура модели;  $\bar{a}$  – параметры модели, которые зависят от управления и структуры. При формировании организационных и технических управляющих воздействий учтены структуры и параметры моделей. Критерий – потребление электроэнергии  $J_{\text{пэ}} = \sum_{\text{минэ}}$ , где  $\sum_{\text{минэ}}$  – минимальное суммарное электропотребление;  $\bar{y}(t_0)$  и  $\bar{y}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1}) \geq \sum_{\text{минэ}}$ . Первое ограничение – бюджет  $E_0 = \sum_{\text{максэ}}$ , где  $\sum_{\text{максэ}}$  – максимальное суммарное электропотребление, второе ограничение – функциональность  $E_{\phi} \geq \sum_{\text{минэ}}$ . Формализованная постановка задачи:

$$J_{\text{пэ}} \rightarrow \sum_{\text{минэ}};$$

$$\bar{x} = \bar{x}(t_0); \bar{x}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1});$$

$$\bar{u} = \bar{u}(t_0) + \bar{u}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1});$$

$$\bar{y} = f_0(\bar{x}, \bar{u}, \bar{a}).$$

Элементы, входящие в подсистемы, реализуют различные функции, поэтому вне зависимости от объекта управления, количества и типа реализуемых функций рассчитаем ограничение обеспечения функциональности системы как минимальное суммарное электропотребление оборудования; при условии  $E_{\phi} < \sum_{\min}$ , утрачивается функциональность. Временной интервал наблюдения (во время которого происходили сбор исходных данных и анализ полученных результатов) за энергетической системой – 5 лет (с 2015 по 2020 г.), он включает этап эксплуатации объекта, состоящий из планово-предупредительного, текущего и капитального ремонта. Поставленная задача включает организационные и технические воздействия, поэтому для ее дальнейшего поэлементного исследования и решения произведем декомпозицию: найдем решение для управления потреблением электрической энергии на этапе априори (организационные воздействия),  $\bar{u}(t_0) = \{u_1, u_2, u_3\}$  и  $\bar{u}(t_0) = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}\}$ ; найдем решение в режиме реального времени (технические воздействия),  $\bar{u}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1}) = \{u_4\}$  и  $\bar{u}(t_{i-1}, t_i, t_{i+1}) = \{u_{17}, u_{18}\}$ .

На основе взаимосвязей между элементами построим модели подсистем на этапе априори и в режиме реального времени (рис. 2).

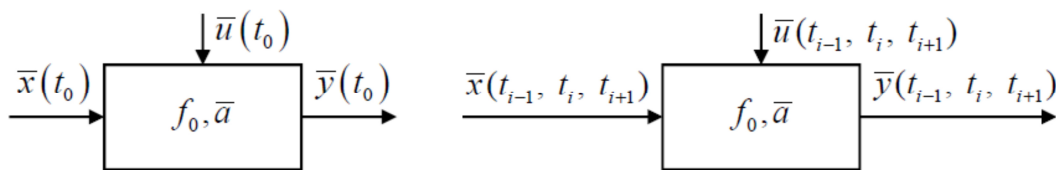


Рис. 2. Модели подсистем

Исходя из моделей подсистем предопределим структуру модели энергосистемы (рис. 3).

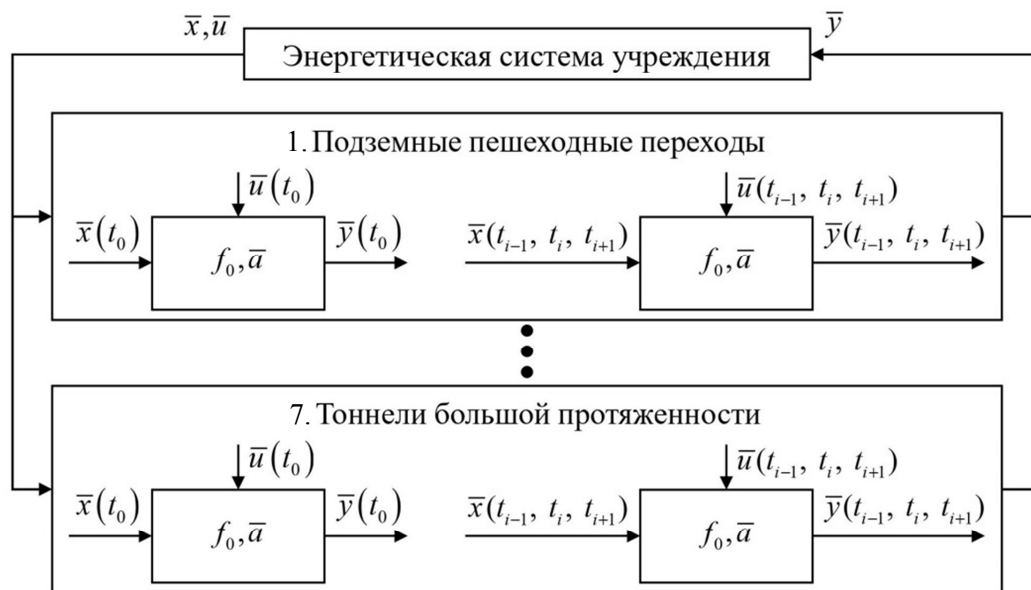


Рис. 3. Структура модели энергетической системы

В рассматриваемой системе управляющие воздействия могут быть разделены в соответствии со способом нанесения воздействия на объект по двум типам: организационные, связанные с проведением определенного вида работ, и технические, влияющие на расчеты с энергосбытовой компанией (табл. 1).

## Организационные и технические управляющие воздействия

| Подсистема или тип инженерного сооружения | Организационное воздействие   | Техническое воздействие   |
|---|---|---|
| Подземные пешеходные переходы             | 1. Применение светодиодных светильников, $u_1$ .<br>2. Применение трансформаторов тока с максимальным межповерочным интервалом – 16 лет, $u_2$ .<br>3. Применение счетчиков с максимальным межповерочным интервалом – 16 лет, $u_3$ .   | 1. Изменение ценовой категории и тарифа на услуги по передаче электроэнергии, выбор из 1, 3 и 4 ценовой категории $u_4$ .   |
| Надземные пешеходные переходы             |   |   |
| Мосты                                     |   |   |
| Тоннели малой протяженности (до 125 м)    |   |   |
| Административные здания                   |   |   |
| Фонтаны                                   | 1. Применение светодиодных светильников, $u_{11}$ .<br>2. Применение трансформаторов тока с межповерочным интервалом – 16 лет, $u_{12}$ .<br>3. Применение счетчиков с межповерочным интервалом – 16 лет, $u_{13}$ .<br>4. Применение электрооборудования (насосы, вентиляторы, электрические печи и т. д.) с классом энергоэффективности А, $u_{14}$ .<br>5. Произведение расчета по уровню напряжения, $u_{15}$ .<br>6. Произведение расчета перехода объекта на оптовый рынок электрической энергии и мощности, $u_{16}$ . | 1. Изменение ценовой категории и тарифа на услуги по передаче электроэнергии, выбор из 3 или 4 ценовой категории, $u_{17}$ .<br>2. Изменение профиля мощности, $u_{18}$ . |
| Тоннели большой протяженности             |   |   |

Организационные управляющие воздействия применяются на этапе априори  $t_0$ , до запуска системы электроснабжения объекта. А техническое управляющее воздействие применяется в режиме реального времени  $t_{i-1}$ ,  $t_i$ ,  $t_{i+1}$ , при эксплуатации системы электроснабжения.

**Результаты исследования**

Разработан алгоритм определения оптимального управленческого решения в энергетической системе учреждения (рис. 4) с учетом заданного критерия и 2-х ограничений.

Исходя из принадлежности элемента к одной из семи подсистем, сформированы и введены исходные данные для расчета: потребление электроэнергии за все время работы электроустановки, управляющие воздействия (организационные и технические), бюджет. Информация распределяется по модулям: планово-предупредительный, текущий и капитальный ремонт, функциональность элемента – для дальнейшего параллельного вычисления. Рассчитано минимальное и максимальное электропотребление в элементе, подсистеме и системе при условии выполнения планируемых работ (к примеру, замена трансформаторов тока). Выполнено сравнение результатов решения с первым ограничением (бюджет) и критерием (потребление электроэнергии). В завершении цикла функциональности получили функции, необходимые для работы элемента, подсистемы и системы. Выполнено сравнение результатов параллельных вычислений со вторым ограничением (функциональность). Если итог сравнения не соответствует заданным требованиям, решение на этом завершается, с последующим предложением корректировки исходных данных элемента и повторного прохождения процедуры расчета. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнут результат, соответствующий заданным требованиям. Результатом прохождения алгоритма является решение, соответствующее заданному критерию и 2-м ограничениям.

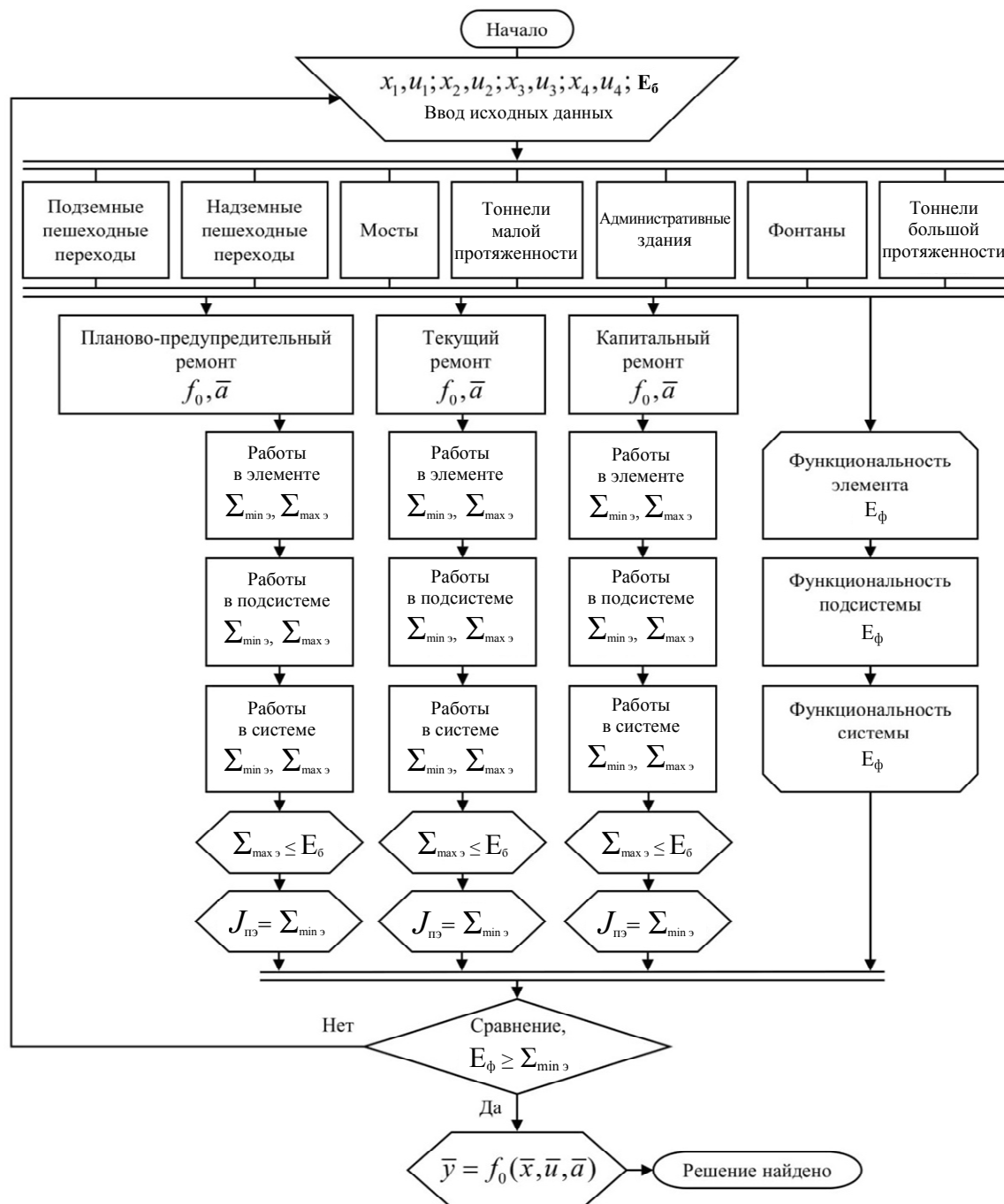


Рис. 4. Алгоритм определения оптимального управленческого решения

Для апробации выбрана подсистема «Фонтаны», элемент – инженерный объект (прототип): фонтан «Дружба народов», по адресу: г. Москва, просп. Мира, д. 119, лит. 24. Выбор данного прототипа позволили проверить 8 управляющих воздействий. Проведены пассивный и активный эксперименты, в ходе которых были приложены 6 организационных и 2 технических воздействия, результатом является проверка алгоритма и решение задачи исследования (табл. 2).

## Результат решения задачи исследования

| Стоимость энергии  | Описание воздействия  | Средние расходы за месяц, руб. |             | Планируемая экономия, руб. |
|--|---|--------------------------------|-------------|----------------------------|
|  |   | фактические                    | планируемые |                            |
| $\bar{y}_{11}$   | Применение светодиодных светильников (организационное)  | 12 544                         | 5 018       | 7 526                      |
| $\bar{y}_{12}$   | Применение трансформаторов тока с межповерочным интервалом 16 лет (организационное)   | 3 172,8                        | 973,8       | 2 199                      |
| $\bar{y}_{13}$   | Применение счетчиков с межповерочным интервалом 16 лет (организационное)  | 28,2                           | 2,82        | 25,38                      |
| $\bar{y}_{14}$   | Применение электрооборудования с классом энергоэффективности А (организационное)  | 6 557,4                        | 1 502,7     | 5 054,7                    |
| $\bar{y}_{15}$   | Произведение расчета по уровню напряжения (организационное)   | 290 893,9                      | 242 753,4   | 48 140,5                   |
| $\bar{y}_{16}$   | Произведение расчета перехода объекта на оптовый рынок электрической энергии и мощности (организационное)                   | 290 893,9                      | 63 920,8    | 226 973,1                  |
| $\bar{y}_{17}$   | Изменение ценовой категории и тарифа на услуги по передаче электроэнергии, выбор из 3 или 4 ценовой категории (техническое) | 34 907,3                       | 31 657,1    | 3 250,2                    |
| $\bar{y}_{18}$   | Изменение профиля мощности (техническое)  | 7 536,4                        | 3 318,6     | 4 217,8                    |
| Итоговая планируемая экономия финансовых средств на 1-ом объекте (фонтан «Дружба народов»), без учета $\bar{y}_{15}$ и $\bar{y}_{16}$ (всего 869 объектов) |   |                                |             | 22 273,08                  |

Решения для оставшихся шести подсистем будут аналогичны, с учетом объема электропотребления.

Исследован существующий подход к выработке управленческих решений в процессе электропотребления энергосистемы [8, 9], направленный на минимизацию финансовых расходов. Предложен алгоритм определения оптимального управленческого решения, учитывающий функциональность системы, выделяемый бюджет и минимизацию финансовых расходов на оплату потребленной электроэнергии. Процедуру расчета можно дополнить другими параметрами энергопотребления (газа, холодной и горячей воды) и применять в различных энергосистемах [10, 11]. Результаты исследования применимы при разработке программного обеспечения, которое на основе исходных данных автоматически определяет итоговые показатели системы и предлагает оптимальное решение, паритетное заданным требованиям.

### Выводы

Произведено экспериментальное исследование на объекте «Фонтан «Дружба народов»», изменена ценовая категория (с 3-й на 4-ю,  $\bar{y}_{17}$ ) и профиль мощности электрооборудования ( $\bar{y}_{18}$ ), что привело в 2019 г. к средней экономии в месяц 7 468 руб., а статья расходов «Оплата потребленной электроэнергии» на объекте сократилась на 2,56 % (от 290 893,9 руб.).

Предложен опытно проверенный алгоритм выбора оптимального управленческого решения в энергетической системе. На действующем объекте решена и реализована задача исследования, выполнена минимизация финансовых расходов в процессе электропотребления. Найдены и экспериментально проверены решения для управления потреблением электрической энергии на этапе априори и в режиме реального времени, которые направлены на минимизацию финансовых расходов при эксплуатации функциональной энергетической системы учреждения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурков В. Н., Коргин Н. А., Новиков Д. А. Введение в теорию управления организационными системами / под ред. чл.-корр. РАН Д. А. Новикова. М.: Либроком, 2009. 264 с.
2. Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformationen: Bundesamt für Energie BRE // Schlussbericht. 29 Sep. 2010. CH: 2010. 195 с.

3. *Akzeptanz* und politische Partizipation in der Energietransformation. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-658-24760-7> (дата обращения: 30.01.2020).
4. *Energieeffizienz* und Energiemanagement. URL: <https://www.springer.com/de/book/9783834819413> (дата обращения: 09.02.2020).
5. Energiemanagement. URL: <https://www.springer.com/de/book/9783658028336> (дата обращения: 30.01.2020).
6. IT-gestütztes Ressourcen und Energiemanagement. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-35030-6> (дата обращения: 30.01.2020).
7. Балакирев В. С., Дворецкий С. И., Аниськина Н. Н. Математическое моделирование технологических процессов: учеб. пособие / под ред. В. С. Балакирева. Ярославль: Изд. дом Н. П. Пастухова, 2018. 352 с.
8. Energiespeicher Bedarf, Technologien, Integration. URL: <https://www.springer.com/de/book/9783662488928> (дата обращения: 31.01.2020).
9. Validation and Verification of Automated Systems. URL: <https://www.springer.com/de/book/9783030146276> (дата обращения: 09.02.2020).
10. The Renewable Energy Transition. URL: <https://www.springer.com/de/book/9783030291143> (дата обращения: 09.02.2020).
11. Bendel O. Energiemanagement. URL: <https://wirtschaftslexikon.gab-ler.de/definition/energiemanagement-53997> (дата обращения: 31.01.2020).

Статья поступила в редакцию 01.04.2020

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Устюгов Никита Викторович** – Россия, 111250, Москва; Национальный исследовательский университет «МЭИ»; аспирант кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами; [ustyugovnv@dom.mos.ru](mailto:ustyugovnv@dom.mos.ru).

**Проталинский Олег Мирославович** – Россия, 111250, Москва; Национальный исследовательский университет «МЭИ»; д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры автоматизированных систем управления тепловыми процессами; [protalinskiy@gmail.com](mailto:protalinskiy@gmail.com).



### **MANAGEMENT DECISION ALGORITHM IN ENERGY SYSTEM OF ENTERPRISE**

***N. V. Ustyugov, O. M. Protalinsky***

*National Research University "Moscow Power Engineering Institute",  
Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article presents the research objective to develop and test an algorithm for choosing a managerial decision in the energy system. There have been described the managerial decisions made in the organization when consuming electrical energy. The system was decomposed into subsystems with the allocation of the applied optimal organizational and technical control actions. The models of subsystems with the subsequent aggregation into a single structure of the model of the energy system are presented. There has been proposed an algorithm for determining the optimal managerial decision in the energy system, which checks the decisions taking into account the given criterion and limitations. The problem of power consumption management is formulated taking into account the minimization of financial costs, and its solution is found within the

limits of one subsystem. Experimental studies have been carried out that have shown practical applicability and financial savings obtained due to the application of the developed algorithm, which indicates the possibility of further use of the research results in the energy systems of enterprises of the Russian Federation and abroad.

**Key words:** managerial decision algorithm, energy system of the organization, power consumption, minimization of financial expenses, functionality, budget.

**For citation:** Ustyugov N. V., Protalinsky O. M. Management decision algorithm in energy system of enterprise. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2020;4:62-69. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2020-4-62-69.

#### REFERENCES

1. Burkov V. N., Korgin N. A., Novikov D. A. *Vvedenie v teoriyu upravleniya organizatsionnymi sistemami* [Introduction to theory of organizational systems management]. Pod redaktsiei chl.-korr. RAN D. A. Novikova. Moscow, Librokom Publ., 2009. 264 p.
2. Mehr Energieeffizienz durch gezielte Anwenderinformationen: Bundesamt für Energie BRE. Schlussbericht, 29 Sep. 2010, CH: 2010, 195 p.
3. Akzeptanz und politische Partizipation in der Energietransformation. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-658-24760-7> (accessed: 30.01.2020).
4. Energieeffizienz und Energiemanagement. Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783834819413> (accessed: 09.02.2020).
5. Energiemanagement. Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783658028336> (accessed: 30.01.2020).
6. IT-gestütztes Ressourcen und Energiemanagement. Available at: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-642-35030-6> (accessed: 30.01.2020).
7. Balakirev V. S., Dvoretiskii S. I., Anis'kina N. N. *Matematicheskoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of technological processes: tutorial]. Pod redaktsiei V. S. Balakireva. Iaroslavl', Izd. dom N. P. Pastukhova, 2018. 352 p.
8. Energiespeicher Bedarf, Technologien, Integration. Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783662488928> (accessed: 31.01.2020).
9. Validation and Verification of Automated Systems. Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783030146276> (accessed: 09.02.2020).
10. The Renewable Energy Transition. Available at: <https://www.springer.com/de/book/9783030291143> (accessed: 09.02.2020).
11. Bendel O. Energiemanagement. Available at: <https://wirtschaftslexikon.gab-ler.de/definition/energiemanagement-53997> (accessed: 31.01.2020).

The article submitted to the editors 01.04.2020

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ustyugov Nikita Viktorovich** – Russia, 111250, Moscow; National Research University Moscow Power Engineering Institute; Postgraduate Student of the Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; [ustyugovnv@dom.mos.ru](mailto:ustyugovnv@dom.mos.ru).

**Protalinsky Oleg Miroslavovich** – Russia, 111250, Moscow; National Research University Moscow Power Engineering Institute; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Automated Control Systems for Thermal Processes; [protalinskiy@gmail.com](mailto:protalinskiy@gmail.com).

