

9. Matveeva E.A. A model for the implementation of integrated enterprise management systems and the calculation of economic performance indicators. *Vestnik SGEU*, 2011, no. 10 (84), pp. 44–50. (In Russ.)
10. Matveeva E.A. Effective Small Batch Management Practices. *Vestnik komp'yuternyh i informatsionnyh tehnologij*, 2007, no. 2, pp. 29–37. (In Russ.)

Received 04.03.2021

УДК 620.9, 303.732

АЛГОРИТМ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИОНАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Сагитова Л.А.

Самарский государственный технический университет, Самара, РФ

E-mail: l0410@mail.ru

Функционирование энергетических систем в условиях постоянных преобразований внешней среды в совокупности с их высокой сложностью приводят к необходимости принятия сложных управленческих решений. В данной статье был проведен анализ деятельности энергосистемы по повышению эффективности её функционирования на примере Самарской области. Для повышения эффективности управления энергосистемой была разработана структура системы поддержки принятия решений. В предложенном алгоритме был реализован принцип системного подхода к ресурсосбережению в энергетических производствах. Построены математические модели, позволяющие описать функционирование энергосистемы. Сформулированы обобщённые критерии эффективности работы энергетического оборудования. Сконструирована и предложена система управления, позволяющая получать научно обоснованные управленческие решения в сфере инвестирования в энергетику.

Ключевые слова: управление, эффективность энергосистемы, структурный синтез, математическое моделирование, производственная функция, архитектура алгоритма системы поддержки принятия решений

Введение

Энергетика является одной из важнейших отраслей экономики РФ и оказывает влияние на качество жизни людей и развитие промышленности. В соответствии с Указом Президента РФ от 07.07.2011 № 899 одними из приоритетных направлений развития науки, техники и технологий в России являются энергосбережение, энергоэффективность и ядерная энергетика. Всё это подтверждает важность организации мероприятий, направленных на повышение эффективной деятельности энергопредприятий.

Для повышения эффективности работы энергопроизводств необходимо совершенствование структур и методов системного управления. Поэтому актуальной является разработка алгоритма системы поддержки принятия решений (СППР) для анализа и формирования математически обоснованных решений управления энергетическим комплексом. Разработка алгоритма СППР проводилась для Самарской энергосистемы, состоящей из крупнейших энергетических предприятий Самарской области, входящих в состав ПАО «Т Плюс».

Анализ структуры энергетической системы Самарской области

Исследована структура данной энергосистемы. В настоящее время в состав энергосистемы входят семь теплоэлектроцентралей. Установленная электрическая мощность энергосистемы составляет – 2867,9 МВт, установленная тепловая мощность – 11366,13 Гкал/ч.

В качестве элементов сложного развивающегося объекта – энергосистемы – примем энергопредприятия (ТЭЦ), входящие в ее состав.

Таким образом, специфика энергосистемы Самарской области, состоящей только из ТЭЦ, осуществляющих совместную выработку тепловой и электрической энергии, обуславливает особенности ее работы и накладывает ограничения на ее деятельность. Раздельная выработка тепловой и электрической энергии на ТЭЦ является экономически неэффективной, например, при переводе ТЭЦ в конденсационный режим работы КПД снижается до значений 10–15 %. Кроме этого, объемы производства энергии энергосистемой определяются нуждами потребителей в реальном времени, так как невозможно складировать и запасать энергию [1–4].

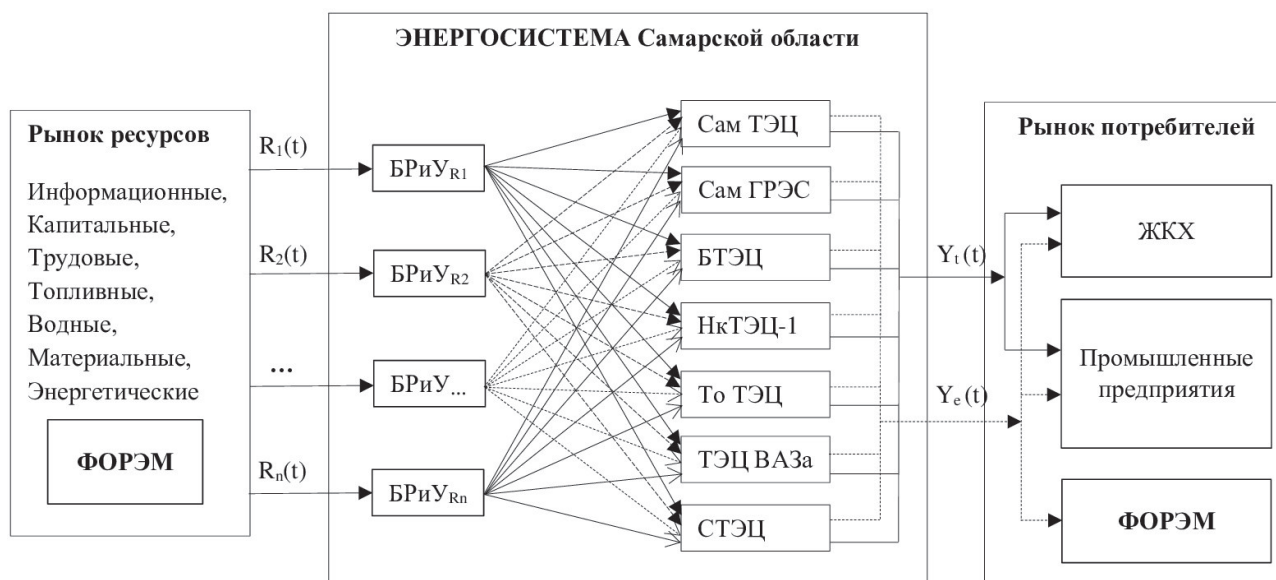


Рисунок 1. Структура энергосистемы Самарской области

На рисунке 1 представлена структурная модель взаимодействия энергосистемы с внешней средой. При производстве энергии используются следующие ресурсы R_i : информационные, капитальные, трудовые, топливные, водные, материальные и энергетические, поступающие в блок распределения и управления соответствующим ресурсом БР и UR_i .

Энергосистема производит тепловую $Y_i(t)$ энергию в виде производственного пара и горячей воды и электроэнергию $Y_e(t)$, вырабатываемую на базе выработки тепловой энергии. Основными потребителями тепловой и электрической энергии, отпускаемой энергосистемой, являются жилищно-коммунальное хозяйство и промышленные предприятия Самарской области [5]. Избыток произведенной электроэнергии может продаваться соседним регионам на Федеральном оптовом рынке электрической энергии и мощности (ФОРЭМ), а ее недостаток – восполняться покупкой на ФОРЭМе электроэнергии.

Построение архитектуры алгоритма системы поддержки СППР

Для повышения эффективности деятельности энергетического производства был сконструирован алгоритм работы СППР, детально представленный на рисунке 2. Данный алгоритм создает единое информационное пространство, работая на двух иерархических уровнях:

- оптимизации работы энергетического оборудования на уровне i -го энергетического предприятия;
- выработке организационно-экономических управляющих решений для всей энергосистемы.

При построении структуры алгоритма были реализованы принципы системного подхода к исследованию сложных систем для решения задач ресурсосбережения. В сконструированном алгоритме объединены экономическое, технологическое, информационное, организационное управление разными видами ресурсов на оперативном и стратегическом уровне.

Построенный алгоритм позволяет провести комплексный анализ функционирования энергосистемы, исследовать внутренние и внешние связи между входными и выходными ресурсами, оценить эффективность деятельности энергосистемы, сконструировать системы управления энергообъектом и сформировать альтернативные варианты для оптимального управления его деятельностью.

Реализация алгоритма СППР будет происходить в результате реализации следующих 6 этапов. Рассмотрим этапы, входящие в алгоритм, более подробно.

Целеполагание и выбор методов исследования. На первом этапе алгоритма исследуются вопросы целеполагания, определяются методы исследования и производится структурный анализ энергосистемы и отдельных энергопредприятий. Кроме этого, выбираются модели и основные параметры, характеризующие работу объекта, для дальнейшего анализа.

Эффективность функционирования отдельной ТЭЦ характеризуется следующими основными показателями: удельным расходом топлива на производство тепловой энергии, электрической энергии, КПД котельных агрегатов, коэффициентом использования топлива, расходом электроэнергии на собственные нужды.

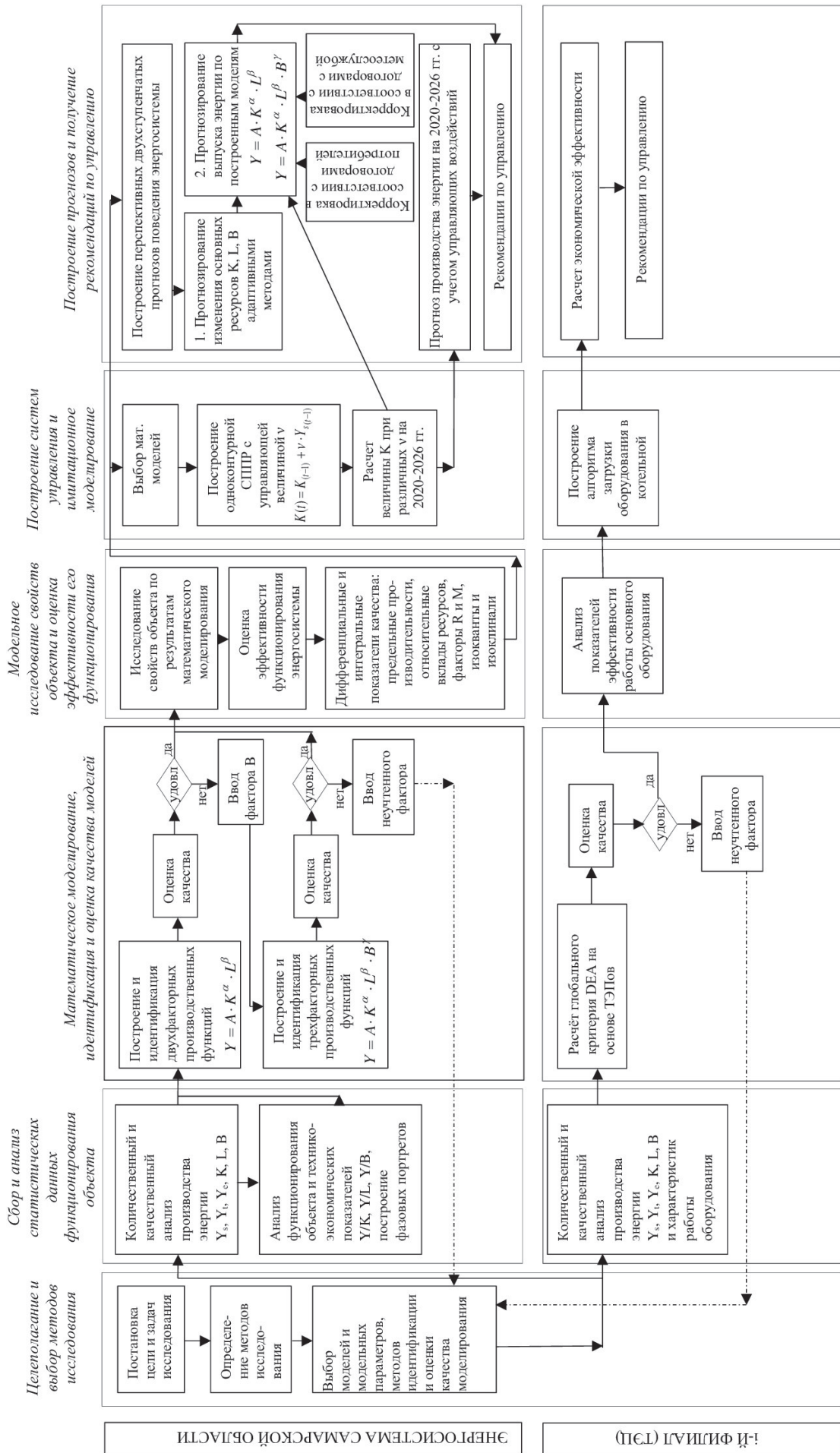


Рисунок 2. Архитектура алгоритма поддержки принятия решений по повышению эффективности функционирования энергосистемы

На уровне энергосистемы основными ресурсами, оказывающими влияние на производство энергии, являются капитальные $K(t)$, трудовые $L(t)$ и топливные $B(t)$ ресурсы.

Сбор и анализ статистических данных функционирования объекта. На уровне энергетических предприятий при реализации второго этапа алгоритма происходят сбор и первичная обработка значений параметров системы контрольно-измерительных приборов (КИП), сравнение их с оптимальными, расчет и анализ технико-экономических показателей (ТЭП) работы оборудования в реальном времени и формирование отчетов и режимных карт.

Работа энергетического оборудования характеризуется более чем 50 показателями, из которых были выделены 8 основных [6].

1. Удельный расход топлива, $G_{\text{топл}}$.
2. Удельный расход электроэнергии на тягу и дутье, $\mathcal{E}_{\text{то}}$.
3. Температура уходящих газов, $t_{\text{ух.н}}$.
4. Отклонение от оптимального значения разряжения в топке котла, ΔP_n .
5. Содержание оксидов азота в продуктах сгорания, $V_{\text{NO}_x, n}$.
6. Содержание оксидов углерода в продуктах сгорания, $V_{\text{CO}_x, n}$.
7. Содержание диоксидов углерода в продуктах сгорания, $V_{\text{CO}_2, n}$.
8. КПД, η_n .

Полученные от каждого предприятия данные направляются на уровень энергосистемы.

На уровне энергосистемы на основе методов статистического анализа проводится качественный и количественный анализ входных и выходных параметров деятельности энергосистемы в целом: капитальных $K(t)$, трудовых $L(t)$ и топливных $B(t)$ ресурсов и производства тепловой $Y_t(t)$ и электрической $Y_e(t)$ энергии; а также анализ технико-экономических показателей функционирования, в частности текущих производительностей ресурсов – фондоотдачи Y/K , производительности труда Y/L и топливоотдачи Y/B . Кроме этого, исследуется устойчивость системы и эффективность использования ресурсов по фазовым портретам энергосистемы в пространстве состояний, характеризующих эффективность ее работы.

Математическое моделирование, идентификация и оценка качества моделей. На уровне отдельных ТЭЦ при выполнении данного этапа оценивается и сравнивается эффективность работы основного оборудования – котлов. Поскольку их работа характеризуется большим количеством

различных параметров, были сформированы обобщенные критерии экономичности, экологичности, технологичности работы оборудования и глобальный критерий эффективности, объединяющий предыдущие. В качестве входных параметров использовались ТЭП, проанализированные в работе [7]. Для определения критериев эффективности использовался метод многокритериального оценивания DEA или «Анализ среды функционирования», позволяющий провести сравнительную оценку котлов.

На уровне энергосистемы при выполнении данного этапа алгоритма проводятся построение математических моделей, описывающих деятельность энергосистемы и взаимосвязи между производством энергии и использованием основных ресурсов, идентификация построенных моделей и оценка их качества. Если качество построенных моделей неудовлетворительно, то в математическую модель вводится дополнительная информация и влияющие на производственную деятельность факторы.

В качестве математических моделей, описывающих взаимосвязи между объемом затрачиваемых ресурсов и производством энергии, были приняты двухфакторные (1) и трехфакторные (2) степенные производственные функции типа Кобба – Дугласа [5; 8]:

$$Y(t) = AK(t)^\alpha L(t)^\beta, \quad (1)$$

$$Y(t) = AK(t)^\alpha L(t)^\beta B(t)^\gamma, \quad (2)$$

где A – масштабный коэффициент; α , β и γ – коэффициенты эластичности (3), характеризующие эффективность использования капитальных, трудовых и топливных ресурсов в производственных процессах соответственно.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{K}{Y} \frac{\partial Y}{\partial K} = \frac{\partial(\ln Y)}{\partial(\ln K)}; \\ \beta &= \frac{L}{Y} \frac{\partial Y}{\partial L} = \frac{\partial(\ln Y)}{\partial(\ln L)}; \\ \gamma &= \frac{B}{Y} \frac{\partial Y}{\partial B} = \frac{\partial(\ln Y)}{\partial(\ln B)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Идентификация проводилась с помощью метода наименьших квадратов на основе статистических данных деятельности энергосистемы.

Модельное исследование свойств объекта и оценка эффективности его функционирования. На уровне отдельных энергетических производств проводится анализ критериев эффективности работы основного оборудования, в результате которого формируется комплексная оценка работы основного оборудования с учетом всех выбранных частных показателей эффективности.

На уровне энергосистемы на основе построенных и идентифицированных моделей исследуются ее свойства и осуществляется оценка эффективности ее функционирования.

Для оценки эффективности деятельности энергосистемы были разработаны дифференциальные и интегральные критерии эффективности.

Для исследования эффективности использования каждого вида ресурсов рассматривались предельные производительности капитальных $\partial Y/\partial K$, трудовых $\partial Y/\partial L$ и топливных $\partial Y/\partial B$ ресурсов. Была проведена оценка влияния на деятельность энергосистемы фактора изменения масштаба производства M и фактора совершенствования энергетических процессов R . Исследовалось влияние относительных вкладов капитальных W_k и трудовых W_L ресурсов на производство энергии. Кроме этого, было исследовано поведение производственно-технологических процессов в энергосистеме в плоскости параметров капитальных K и трудовых L ресурсов [9; 10].

Построение систем управления и имитационное моделирование. Для каждого предприятия на данном этапе строится алгоритм распределения нагрузки между котельными агрегатами на основе данных, полученных в результате многокритериального оценивания, что позволяет принимать математически обоснованные решения при выборе наиболее оптимальных режимов работы и использовать имеющееся оборудование максимально эффективно.

На уровне энергосистемы данный этап алгоритма представляет собой имитационное моделирование производственно-экономических процессов в энергосистеме на основе ранее построенных и идентифицированных моделей. В имитационной модели исследовалось влияние инвестирования в обновление капитальных ресурсов на эффективность производства энергии.

Формирование инвестиций происходит за счет доли прибыли в виде выпуска продукции за предыдущий финансовый год с помощью управляющей величины v . В зависимости от величины v на следующий год определяются

$$K(t) = K_{(t-1)} + vY_{s(t-1)}. \quad (4)$$

Построение прогнозов и получение рекомендаций по управлению. При выполнении заключительного этапа алгоритма определяется экономическая эффективность мероприятий по изменению распределения нагрузки в котельной в соответствии с критериями эффективности, формируются рекомендации по управлению для лиц, принимающих решения, в частности, фор-

мируются направления, в первую очередь нуждающиеся в улучшении и ремонте.

На уровне энергосистемы в целом проводится двухступенчатое построение прогнозов поведения энергосистемы как с учетом изменения финансирования основных фондов, так и без учета управляющих воздействий. Для получения прогнозных значений основных ресурсов использованы адаптивные методы прогнозирования. Далее по математической модели производственной функции (2) определяются прогнозные значения производства энергии. Имитационная модель (4) позволяет определить сценарий поведения энергосистемы с учетом управляющих воздействий, величина капитальных ресурсов определялась для различных значений v .

С учетом построенных прогнозов функционирования системы на этом этапе формируются рекомендации по управлению энергосистемой для лиц, принимающих решения.

Выводы

1. Предложен алгоритм СППР, который позволяет на базе методов системного подхода проводить комплексный анализ деятельности энергосистем и оценку энергоэффективности их функционирования на двух уровнях – на общем уровне и на уровне энергетических производств с учетом особенностей совместного производства тепловой и электрической энергии.

2. На уровне энергосистемы исследованы внутренние и внешние связи между ресурсами, сконструированы системы управления функционированием объекта, предложены сценарии поведения и сформированы адаптивные варианты деятельности энергосистемы.

3. На уровне энергетического производства исследованы основные параметры, характеризующие работу котельного оборудования, разработаны обобщенные критерии, позволяющие проводить многокритериальную оценку эффективности основного оборудования, предложен алгоритм распределения нагрузки котельной, повышающий экономичность и технологичность ее работы.

4. Разработанный алгоритм можно использовать для анализа энергоэффективности аналогичных энергосистем других регионов.

Литература

1. Мелентьев Л.А. Оптимизация развития и управления больших систем энергетики. М.: Высшая школа, 1982. 319 с.
2. Математическое моделирование источников энергоснабжения промышленных предпри-

- ятий / А.И. Зайцев [и др.]. М.: Энергоатомиздат, 1991. 152 с.
3. Модельный анализ эффективности совместного производства тепловой и электрической энергии региональной энергосистемой / Н.В. Дилигенский [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия «Технические науки». 2008. № 5. С. 37–40.
 4. Гаврилова А.А., Салов А.Г., Гаврилов В.К. Системный анализ влияния режимов работы энергетического оборудования на эффективность производства тепловой и электрической энергии энергосистемой // Труды МНТК «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики и пути их решения». Саратов: СарНЦ РАН; СГТУ, 2008. Вып. 5. С. 189–195.
 5. Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В. Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Самара: Офорт, 2005. 126 с.
 6. Гаврилов В.К., Гаврилова А.А. Модельный анализ эффективности функционирования региональных энергопроизводств // Труды III ВНТК с межд. участием «Математическое моделирование и краевые задачи». Самара: СамГТУ, 2006. С. 43–45.
 7. Обобщенная оценка сравнительной эффективности работы котельного оборудования / А.Г. Салов [и др.] // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура: научно-технический журнал. 2016. № 2. С. 140–146.
 8. Замков О.О., Толстопятенко А.В., Черемных Ю.Н. Математические методы в экономике. М.: МГУ, Изд-во «ДИС», 1997. 368 с.
 9. GavriloVA A.A., Salov A.G., Sagitova L.A. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // *XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. Samara. 2019. P. 736–741. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644> (дата обращения: 10.03.2021).
 10. GavriloVA A.A., Salov A.G., Sagitova L.A. Assessment of the Efficiency of the Samara Region's Energy Complex Under Changing Conditions // *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2020. P. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9271116> (дата обращения: 10.03.2021).

Получено 15.03.2021

Сагитова Ляйсан Акзамовна, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарского государственного технического университета. 443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Тел. +7 960 814-29-30. E-mail: 10410@mail.ru

STRUCTURE OF THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THE REGIONAL ENERGY COMPLEX

Sagitova L.A.

Samara State Technical University, Samara, Russian Federation

E-mail: 10410@mail.ru

Operation of power system in conditions of constant changes in the external environment combined with their high complexity leads to the need for sophisticated management decisions. This article analyzes the activities of the power system to improve the efficiency of its functioning on the example of the Samara region. The structure of the decision support system was developed to improve the efficiency of power system management. In the proposed algorithm, the principle of a systematic approach to resource conservation in energy production was implemented. Mathematical models have been built to describe the functioning of the power system. Generalized criteria for the efficiency of power equipment operation were formulated. A management system was designed and proposed that allows obtaining scientifically grounded management decisions in the field of energy investment.

Keywords: *management, power system efficiency, structural synthesis, mathematical modeling, production function, systems analysis, the architecture of the decision support system algorithm*

DOI: 10.18469/ikt.2021.19.2.15

Sagitova Lyaysan Akzamovna, Samara State Technical University, 244, Molodogvardeyskaya Street, Samara, 443100, Russian Federation; PhD student of Heat and Gas Supply and Ventilation Department. Tel. +7 960 814-29-30. E-mail: 10410@mail.ru

References

1. Melent'ev L.A. *Optimizing the Development and Management of Large Energy Systems*. Moscow: Vysshaja shkola, 1982, 319 p. (In Russ.)
2. Zajtsev A.I. et al. *Mathematical Modeling of Energy Supply Sources for Industrial Enterprises*. Moscow: Energoatomizdat, 1991, 152 p. (In Russ.)
3. Diligenskij N.V. et al. Model analysis of the efficiency of joint production of heat and electric energy by a regional power system. *Izvestija vuzov. Severo-Kavkazskij region. Serija «Tehnicheskie nauki»*. 2008, no. 5, pp. 37–40. (In Russ.)
4. Gavrilova A.A., Salov A.G., Gavrilov V.K. System analysis of the influence of operating modes of power equipment on the efficiency of heat and electric energy production by the power system. *Trudy MNTK «Sovremennye nauchno-tehnicheskie problemy teploenergetiki i puti ih reshenija»*. Saratov: SarNTs RAN; SGTU, 2008, no. 5, pp. 189–195. (In Russ.)
5. Diligenskij N.V., Gavrilova A.A., Tsapenko M.V. *Construction and Identification of Mathematical Models of Production Systems*. Samara: Ofort, 2005, 126 p. (In Russ.)
6. Gavrilov V.K., Gavrilova A.A. Model analysis of the efficiency of regional energy production. *Trudy III VNTK s mezhd. uchastiem «Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi»*. Samara: SamGTU, 2006, pp. 43–45. (In Russ.)
7. Salov A.G. et al. Generalized assessment of the comparative efficiency of boiler equipment. *Vestnik SGASU. Gradostroitel'stvo i arhitektura: nauchno-tehnicheskij zhurnal*, 2016, no. 2, pp. 140–146. (In Russ.)
8. Zamkov O.O., Tolstopjatenko A.V., Cheremnyh Yu.N. *Mathematical Methods in Economics*. Moscow: MGU, Izd-vo «DIS», 1997, 368 p. (In Russ.)
9. Gavrilova A.A., Salov A.G., Sagitova L.A. System analysis of the effectiveness of regional energy system management in the conditions of transformation. *XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP)*. Samara, 2019, pp. 736–741. DOI: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644> (accessed: 10.03.2021).
10. Gavrilova A.A., Salov A.G., Sagitova L.A. Assessment of the efficiency of the samara region's energy complex under changing conditions. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2020, pp. 1–4. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9271116> (accessed: 10.03.2021).

Received 15.03.2021