

УДК 620.9:620.9.004.18

МЕТОД ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Выгорова Е.А., Елтышев Д.К., Хорошев Н.И.

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: eltyshv@msa.pstu.ru, horoshev@msa.pstu.ru*

В статье предложен метод обеспечения интеллектуальной поддержки процессов энергетического менеджмента как одного из ключевых инструментов повышения энергоэффективности и конкурентоспособности отечественных предприятий. Метод основан на построении единого виртуального пространства исследуемых энергетических объектов с последующим моделированием и анализом особенностей и режимов их функционирования. Предполагается математическая формализация процессов, оказывающих влияние на параметры энергоэффективности объектов, и реализация полученных моделей в среде имитационного моделирования. Разработана функционально-логическая схема поддержки процессов энергетического менеджмента, которая базируется на интеграции с классической процедурой plan-do-check-act и интеллектуализации деятельности энергоменеджера в области выбора и планирования энергосберегающих мероприятий. Обозначены аспекты реализации функций виртуального пространства, используемых для моделирования и оценки состояния энергетических объектов в рамках предлагаемого метода.

Ключевые слова: энергетический менеджмент, энергетический объект, энергосбережение, автоматизация, принятие решений, прогнозирование, моделирование

METHOD OF INTELLIGENT SUPPORT FOR ENERGY MANAGEMENT

Ygolovala E.A., Eltyshv D.K., Khoroshev N.I.

*Perm National Research Polytechnic University, Perm,
e-mail: eltyshv@msa.pstu.ru, horoshev@msa.pstu.ru*

In the article a method of intelligent support for energy management as a key tool of increasing energy efficiency and competitiveness of domestic enterprises is proposed. The method is based on the construction of energy facilities integrated virtual environment followed by modeling and analysis of their operating features and modes. Mathematical formalization of the processes that influence the facilities energy efficiency parameters, and the implementation of the models obtained in the simulation environment is supposed. A functional-logical scheme for energy management support is developed. This scheme is based on the integration with the classical procedure of plan-do-check-act and intellectualization of energy manager activities for the selection and planning of energy saving measures. The aspects of implementing of the virtual space functions used for the modeling and evaluation of energy facilities state in the proposed method are denoted.

Keywords: energy management, energy facility, energy saving, automation, decision making, prognosis, simulation

Среди наиболее актуальных проблем в области построения отечественных систем энергетического менеджмента (ЭМ) в различных сегментах человеческой деятельности следует выделить высокую энергоёмкость процессов, связанных с производством, распределением и потреблением энергетических ресурсов; несовершенство методов и механизмов планирования и реализации энергосберегающих мероприятий и технологий; отсутствие квалифицированных специалистов в области системной реализации концепции энергосбережения, а также низкий уровень стандартизации процессов ЭМ [3, 9]. Кроме того, структура управления предприятием, а также отсутствие необходимого математического, алгоритмического и информационного обеспечения процессов ЭМ, как правило, не позволяют системно подходить к задачам повышения энергетической эффективности сложных, территориально распределенных объектов энергетической системы [4, 5, 8]. Поэтому разработка и усовершенствование

методов и средств поддержки процессов ЭМ являются значимым фактором развития современной энергетики.

Постановка задачи моделирования процессов ЭМ

Рекомендательный характер положений стандарта по разработке и внедрению систем ЭМ ISO 50001:2011 [12] обуславливает необходимость поиска эффективных решений с учетом международного опыта. Использование существующих частных концепций [4, 8, 9] далеко не всегда позволяет достичь стабильного количественного и качественного прироста энергоэффективности при их тиражировании на отечественных предприятиях. Требуются длительная практика внедрения, опыт эксплуатации и усовершенствования систем ЭМ, их адаптация к работе конкретных предприятий.

Повысить оперативность выполнения сформулированных требований, а также снизить стоимость возможных потерь от

нерационального применения технологий можно за счет предварительного анализа их эффективности с применением компьютерной имитации. С этой целью предлагается метод поддержки процессов ЭМ, основанный на построении виртуального пространства (ВП) исследуемых энергетических объектов в среде моделирования, введении математических моделей исследуемых элементов в пространство и анализе их поведения. Эффект в этом случае достигается за счет всесторонней оценки объектов с использованием единой виртуальной среды, способной к эволюционному развитию путем выявления оптимальных реализаций, предпосылок их возникновения, анализа применимости решений для аналогичных объектов или в смежных отраслях.

Метод поддержки процессов ЭМ

На рис. 1 приведена функционально-логическая схема поддержки процессов ЭМ, иллюстрирующая предлагаемый метод.

Согласно данной схеме реализация процессов ЭМ состоит в следующем. Команда энергоменеджеров (Э) проводит исследование энергетических объектов на предприятии, характеризующихся набором различных параметров (характеристик) $O = [o_1, o_2, \dots, o_N]$, формулирует энергетическую политику (совместно с руководством), осуществляет планирование мероприятий, их внедрение и сопровождение. Контроль процессов ЭМ производится на основе сравнения базового и текущего энергопотребления, величина которого определяется в результате мониторинга энергетических параметров объекта [10].

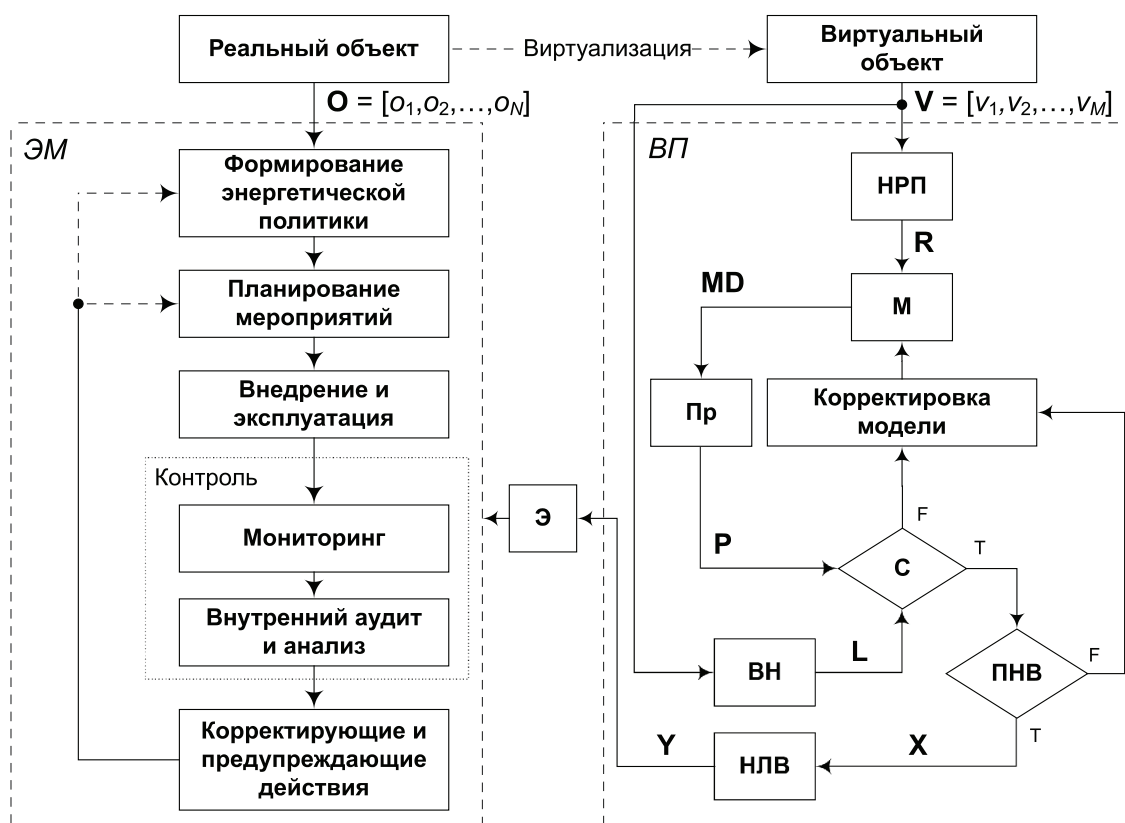


Рис. 1. Функционально-логическая схема поддержки процессов ЭМ

Поддержка процессов ЭМ, в первую очередь планирования энергосберегающих мероприятий, реализована на базе виртуальной среды ВП, в состав которой входят следующие функциональные блоки:

– автоматического настраиваемого расчета комплекса параметров (НРП) $R = [R_1, R_2, \dots, R_n]$ моделей, где n – количе-

ство структурных элементов, образующих объект исследования;

– математического моделирования (М);

– прогнозирования энергопотребления (Пр) на основе модельных данных $MD = [MD_1, MD_2, \dots, MD_q]$, где q – количество выходных параметров функции М, характеризующих работу как отдельных элементов объекта, так и объекта в целом;

– сравнения (С) значений прогнозных параметров $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_t]$ с нормативными $\mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_k]$, где t – общее количество энергопотребителей и k – количество групп однотипных энергопотребителей;

– выработки норм (ВН) энергопотребления на основе фактических технических данных $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_M]$ об исследуемом объекте, где M – количество структурных элементов объекта исследования и различных настроечных параметров виртуальной среды;

– проверки наличия вариантов (ПНВ) конфигураций моделируемого объекта и формирование параметров $\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_s]$, характеризующих наиболее удачные конфигурации (альтернативы), s – общее количество удачных конфигураций объекта;

– нечеткого логического вывода (НЛВ), содержащего перечень ранжированных мероприятий $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_h]$, используемых Э при принятии решений, в соответствии с выбранной оптимальной конфигурацией.

Остановимся на некоторых ключевых аспектах реализации обозначенных функций ВП.

Функция НРП обеспечивает настройку ВП и определение параметров, необходимых для последующего моделирования энергосистем и входящих в их состав отдельных элементов. Для снижения размерности потоков измерительной информации, получаемой с исследуемого объекта, используются механизмы сортировки и фильтрации.

Моделирование поведения исследуемых объектов и протекающих в них физических и других процессов, оказывающих влияние на параметры энергоэффективности, осуществляется по принципу статистической идентификации (измерения, отказы и др.), а также на базе общеизвестных математических зависимостей и вновь разрабатываемых моделей элементов энергосистемы (в том числе нечетких, нейросетевых и др.) [6]. При этом используемые модели, как правило, являются многофакторными (рис. 2).

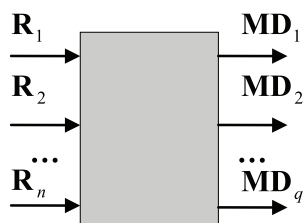


Рис. 2. Многофакторная модель энергетического объекта типа «черный ящик»:

$\mathbf{MD} = f(\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2, \dots, \mathbf{R}_n)$ – вектор выходных параметров, характеризующих работу энергетических систем и их элементов; \mathbf{R}_i , $i = 1, \dots, n$, – комплекс входных параметров (в том числе расчетных)

Математическое моделирование, реализуемое на основе функционального блока М, является эффективным инструментом в руках энергоменеджера, который направлен на определение множества допустимых и недопустимых, в том числе по критерию энергоэффективности, режимов работы энергетических объектов.

Выходной информацией М является конфигурация энергосети \mathbf{MD} , содержащая как значения параметров отдельных моделей, так и структуру связей между ними. Конфигурации могут быть сгенерированы на основе генетических, комбинаторных и других методов [2], либо задаваться экспертом вручную, исходя из его опыта. При этом во избежание дублирования информации на этапе моделирования проверяется наличие конфигурации энергосети в базе данных.

Конкретному варианту конфигурации соответствует определенный уровень потребления используемых энергетических ресурсов. Для оценки и контроля энергоэффективности объектов определенной конфигурации осуществляется адаптивное прогнозирование [7] их энергопотребления \mathbf{P} (1)–(3), что позволяет имитировать в перспективе поведение реальных объектов и проверить корректность задания параметров математических моделей с целью выработки адекватных предупреждающих воздействий.

В ходе эксплуатации системы блок С осуществляет оценку степени отклонения значений параметров энергетического объекта \mathbf{P} на интервалах времени произвольной продолжительности от норм \mathbf{L} , формируемых функцией ВН для различных состояний его функционирования на различных этапах жизненного цикла, в том числе с учетом накопленной статистической информации о работе группы однотипных объектов. Дополнительной функцией С является фиксация в базе данных информации об удачных и неудачных вариантах конфигурации энергосети и всех результатов моделирования, которые учитываются на последующих итерациях поддержки процессов ЭМ.

Наличие альтернативных вариантов конфигураций исследуемого объекта проверяется при помощи функции ПНВ, результаты работы которой учитываются непосредственно на этапе корректировки модели и далее в М (рис. 1).

Заключительный этап интеллектуализации деятельности Э реализует функция НЛВ, которая обеспечивает поддержку при комплексной оценке фактической ситуации в области ЭМ и формировании многоаспектных заключений об альтернативных вариантах повышения энергоэффективности исследуемых энергетических объектов [1, 11].

Поскольку НЛВ осуществляет ранжирование альтернатив (исследуемых конфигураций энергосети) на основе множества критериев не только сугубо технического характера (например, энергопотребление, число часов безотказной работы и др.), но и экономического содержания, то конфигурация **MD** конкретного варианта также хранит в себе всю необходимую информацию о критериях, входящих в последующем в **X**.

В общей математической постановке структура причинно-следственных связей между вариантами повышения энергоэффективности и предпосылками к ним формализуется на основе нечеткой продукционной модели (НПМ), определяемой выражением [1, 11].

$$\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_s\} \rightarrow \mathbf{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_h\}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_i\}$ – параметры удачных конфигураций моделируемого объекта в виде лингвистических переменных (ЛП) с нечеткими термами $\mathbf{A}_i = \{\mathbf{a}_i^1, \mathbf{a}_i^2, \dots, \mathbf{a}_i^d\}$; $\mathbf{Y} = \{y_j\}$ – множество оптимальных энергосберегающих решений в виде ЛП с нечеткими термами $S_j = \{a_j^1, a_j^2, \dots, a_j^H\}$; « \rightarrow » – обозначение процедуры логического вывода.

Поскольку объекты энергетики относятся к классу сложноформализуемых [1, 2, 7, 11], применимость НПМ связана с необходимостью формирования базы знаний (в том числе на основе опыта экспертов), а также с наличием достаточного количества статистической информации об объекте для обучения моделей и повышения их достоверности. Стоит сказать, что для выбора оптимальной конфигурации из множества альтернатив могут быть применены отдельные оптимизационные методы (генетические, нейросетевые, комбинаторные и др.). Однако использование для этой цели моделей НЛВ (1) позволяет решать как формализуемые, так и сложноформализуемые (с позиции построения целевой функции) задачи с сохранением высокой достоверности результатов и их представлением в интуитивно понятной для Э форме. Это достигается применением базы знаний как элемента ВП и ее адаптации к изменениям в процессах ЭМ путем ее расширения и оптимизации параметров функций принадлежности и весов импликативных правил на основе традиционных и гибридных подходов, что значительно расширяет возможности выработки оперативных рациональных решений в многофакторной среде.

Таким образом, у Э появляется возможность применять предлагаемый метод как интеллектуальное средство оптимизации

использования энергетических ресурсов на предприятии, то есть оказывать влияние на исполнение классических функций ЭМ [12] (рис. 1, блок «ЭМ»). При этом ВП работает не с реальными энергообъектами, а с их виртуальными образами, описываемыми математическими моделями (в среде моделирования) с заданной точностью, что позволяет за счет компьютерной имитации снизить стоимость потенциальных потерь от нерационального применения технологий энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Отметим, что предлагаемый метод ориентирован на системы и подсистемы энергообеспечения (освещение, отопление, вентиляция и др.) как отдельных зданий, так и организаций в целом. Ограничения моделей энергетических объектов определяются средой моделирования (например, MATLAB), используемой при задании конфигураций имитационных моделей как отдельных элементов, так и энергосистемы в целом.

Заключение

Практическая значимость предложенного метода заключается в возможности интеграции и комплексного исследования процессов ЭМ на базе ВП разнотипных энергетических объектов с целью повышения оперативности принимаемых решений и обеспечения устойчивого функционирования и развития конкурентного преимущества отечественных организаций. Перспективой метода является автоматизированная система поддержки принятия решений энергоменеджера, формализующая знания об исследуемой предметной области на основе виртуализации энергетических объектов и систем, их моделирования и прогностической оценки разнотипных ситуаций. При этом создание и развитие базы знаний системы позволит накапливать информацию о процессах и механизмах ЭМ для совершенствования существующих и разработки новых методик повышения энергоэффективности рассматриваемых объектов, предусмотренных международными стандартами [12].

Метод получен при поддержке гранта РФФИ № 14-07-96000 р_урала а «Разработка интеллектуальной системы поддержки принятия решений обеспечения безаварийной работы энергетических объектов».

Список литературы

1. Бочкарев С.В., Елтышев Д.К. Методика принятия оптимальных решений при ремонте высоковольтного электро-технического оборудования // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 142–146.

2. Елтышев Д.К., Петроченков А.Б., Бочкарев С.В. К вопросу о применении генетических методов для решения задач поддержки жизненного цикла электрооборудования // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т. 2. – С. 136–142.
3. Елтышев Д.К., Хорошев Н.И. Системный подход к формированию и реализации программ энергосбережения и повышения энергетической эффективности // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5–4. – С. 697–701.
4. Кычкин А.В., Мусихина К.Г., Разепина М.Г. Исследование эффективности создания и внедрения системы энергоменеджмента на промышленном предприятии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 1 (9). – С. 66–79.
5. Кычкин А.В., Хорошев Н.И., Елтышев Д.К. Концепция автоматизированной информационной системы поддержки энергетического менеджмента // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2013. – № 5. – С. 12–17.
6. Моделирование взаимодействия структурных элементов электроэнергетических систем / Б.В. Кавалеров, А.Б. Петроченков, К.А. Один, В.А. Тарасов // Электротехника. – 2013. – № 1. – С. 11–15.
7. Некоторые аспекты технологии эксплуатации электротехнических объектов на основе методов краткосрочного прогнозирования технического состояния / В.П. Казанцев, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин, Н.И. Хорошев // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 28–34.
8. Франк Т. Практика энергетического менеджмента // Энергосбережение. – 2006. – № 3. – С. 32–35.
9. Франк Т., Кычкин А.В., Мусихина К.Г. Государственное управление проектами в области энергосбережения как база для эффективного внедрения лучших практик // Менеджмент в России и за рубежом. – 2014. – № 3. – С. 98–104.
10. Хорошев Н.И., Елтышев Д.К., Кычкин А.В. Комплексная оценка эффективности технического обеспечения энергомониторинга // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5–4. – С. 716–720.
11. Хорошев Н.И., Казанцев В.П. Применение правил нечеткой логики при эксплуатации электротехнического оборудования // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 59–64.
12. ISO 50001:2011. Energy management systems – Requirements with guidance for use: approved on 2011-01-12, 31 pp.
2. Eltyshev D.K., Petrochenkov A.B., Bochkarev S.V. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radiojelektroniki – Proceedings of TUSUR University*, 2009, no. 2, pp. 136–142.
3. Eltyshev D.K., Khoroshev N.I. *Fundamentalnie issledovaniâ – Fundamental research*, 2014, no. 5 (v. 4), pp. 697–701.
4. Kychkin A.V., Musihina K.G., Razepina M.G. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Jeletrotehnika, informacionnye tehnologii, sistemy upravlenija – PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems*, 2014, no. 1 (9), pp. 66–79.
5. Kychkin A.V., Khoroshev N.I., Eltyshev D.K. *Jenergo-bezopasnost' i jenergosberezenie – Science and practice in energetic*, 2013, no. 5, pp. 12–17.
6. Kavalero B.V., Petrochenkov A.B., Odin K.A., Tarasov V.A. *Jeletrotehnika – Electrical engineering*, 2013, no. 1, pp. 11–15.
7. Kazancev V.P., Petrochenkov A.B., Romodin A.V., Khoroshev N.I. *Jeletrotehnika – Electrical engineering*, 2011, no. 11, pp. 28–34.
8. Frank T. *Jenergosberezenie – Energy saving*. – 2006, no. 3, pp. 32–35.
9. Frank T., Kychkin A.V., Musihina K.G. *Menedzhment v Rossii i za rubezhom – Management in Russia and Abroad*, 2014, no. 3, pp. 98–104.
10. Khoroshev N.I., Eltyshev D.K., Kychkin A.V. *Fundamental'nye issledovaniâ – Fundamental research*, 2014, no. 5–4, pp. 716–720.
11. Khoroshev N.I., Kazancev V.P. *Jeletrotehnika – Electrical engineering*, 2011, no. 11, pp. 59–64.
12. ISO 50001:2011. Energy management systems – Requirements with guidance for use: approved on 2011-01-12, 31 pp.

References

1. Bochkarev S.V., Eltyshev D.K. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ja – Scientific and technical gazette of the Volga region*, 2012, no. 6, pp. 142–146.

Рецензенты:

Бочкарев С.В., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Казанцев В.П., д.т.н., доцент, профессор кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации», ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 06.11.2014.