

*А. М. Копин, И. О. Проталинский, Н. А. Медников*

## **ФОРМАЛИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ МИНИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭВРИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

Предлагается обобщенная функциональная схема системы поддержки принятия решений, основанная на модуле эвристического анализа. Отмечается, что в настоящее время, при наличии целого ряда узкоспециализированных информационных систем, отсутствует возможность одновременного решения задач по направлению «Энергоэффективность» и проведения полного многофакторного анализа информации, необходимой для принятия решения о реализации программы снижения потерь и анализа энергопрофиля предприятия. Описана энергетическая сеть предприятия как объект управления. Поставлена задача минимизации потерь энергетических ресурсов в технической сети потребителя при неизменном уровне производительности в общем и частном случае. Сформирована структурная схема управления энергосетью предприятия, а также функциональная схема автоматизированной системы мониторинга энергопотребления предприятия. Определены задачи формирования управляющего воздействия. Результаты анализа позволяют перейти от формализации задачи снижения потерь электроэнергии в общем и частном случае к созданию информационной системы учета энергетических потерь предприятия.

**Ключевые слова:** энергосбережение, экспертные системы, система поддержки принятия решения, энергоэффективность.

### **Введение**

В настоящее время основное направление развития энергетического комплекса характеризуется снижением издержек на производство, транспортировку и потребление электрической энергии. Данная тенденция обусловливается повышением стоимости энергоресурсов, низкой производительностью генерирующих предприятий и постепенным «старением» оборудования. Одним из решений задачи снижения издержек является внедрение энергосберегающих технологий в структуре потребителей электроэнергии.

Для стандартизации работ по данному направлению был разработан и принят стандарт энергетического менеджмента ISO 50001:2011, а в 2013 г. было подписано распоряжение правительства РФ № 512 «Об утверждении программы «Энергоэффективность и развитие энергетики», которая определила основные цели и направления реализации процесса снижения потерь. В соответствии с данными документами предприятиям энергетической и производственной сферы предписано формировать программы повышения энергосбережения.

Снижение издержек на промышленных предприятиях производится за счет адекватного мониторинга энергозатрат как потребителя в целом, так и установленного оборудования в отдельности. Результат мониторинга – список рекомендованных мероприятий по снижению энергетических потерь. Однако мониторинг носит разовый характер и производится раз в три – пять лет, что не позволяет оперативно реагировать на возможные изменения структуры энергопотребления предприятия и на динамическое изменение характеристик установленного оборудования. Решением данной проблемы может стать внедрение управляющего контура, позволяющего проводить непрерывный контроль параметров оборудования и осуществлять мониторинг эффективности управляющих воздействий.

Для реализации данного решения потребуется создание информационной системы, позволяющей автоматизировать мониторинг технологических параметров потребления электроэнергии, анализ и выработку управляющего воздействия для их минимизации, основанного как на индикаторных функциях, так и на экспертных данных в рамках системы поддержки принятия решений (СППР) диспетчера [1].

В настоящее время существует целый ряд узкоспециализированных информационных систем, каждая из которых позволяет выполнять одну из перечисленных задач по направлению «Энергоэффективность»: мониторинг показателей приборов учета предприятий; анализ энергетических потерь в разрезе оборудования предприятия; формирование энергетического профиля предприятия с постановкой целей модернизации энергетической системы; планирование мероприятий по снижению потерь и расчет энергетического и экономического эффекта от их проведения; формирование энергетической программы и инвестиционных показателей.

Однако ни одна из существующих систем не решает все задачи по направлению «Энерго-эффективность» одновременно, что, в свою очередь, не позволяет провести полный многофакторный анализ всей информации, необходимой для принятия решения о реализации программы по снижению потерь и анализу энергопрофиля предприятия [1–3].

Цели наших исследований: описание энергетической сети предприятия как объекта управления; постановка задачи минимизации потерь энергетических ресурсов в технической сети потребителя при неизменном уровне производительности; разработка обобщенной функциональной схемы СППР, выработки управляющего воздействия, минимизации энергетических ресурсов.

Достижение данных целей позволит приблизиться к формированию программы технических и технологических мероприятий, ориентированных на уменьшение объема используемых энергетических ресурсов при сохранении уровня производительности предприятия, а также рассчитать энергетический и экономический эффект.

### Формирование структурной схемы управления энергосети предприятия

Представим потребителя электроэнергии как объект управления, входом которого является вектор состояний уровня электроэнергии от питающей подстанции  $E$ , выход – вектор параметров потребления электроэнергии предприятием, описываемый функцией  $f(E)$ , и дополнительный параметр, характеризующий производительность предприятия  $Y$ , по которому производится регулирование:

$$\begin{cases} f(E) \rightarrow \min, \\ Y = \text{const}. \end{cases}$$

Таким образом, для потребителя  $N$  необходимо выработать управляющее воздействие для минимизации потребляемой энергии  $E$  при неизменности параметров производительности предприятия  $Y$ .

Для решения данной задачи необходимо сформировать представление о структуре сети оборудования предприятия.

Представим потребителя электроэнергии как сетевую структуру, состоящую из конечного числа взаимосвязанных элементов с потреблением электроэнергии  $i$ -го элемента –  $E_i$  и вектором параметров производительности  $Y_i$ . Таким образом, потребителя  $X$  электроэнергии можно представить как совокупность множества элементов  $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ , где  $n \in N$ , и множества взаимосвязей между элементами  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ , где  $m \in N$ , при этом  $n \neq m$  вследствие сетевой структуры сети. Из данного представления делаем вывод о том, что вследствие динамичности режимов работы потребление электроэнергии потребителем (сетевой структурой) в общем равно сумме потребления всеми его элементами:

$$E = \sum_{i=1}^n E_i,$$

в то время как производительность потребителя в общем не равна сумме производительности его элементов:

$$Y \neq \sum_{i=1}^n Y_i,$$

что обусловлено множеством возмущающих воздействий  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ ,  $n \in N$ , действующих на  $i$ -й элемент системы. Вследствие разнородности элементов структуры сети электропотребления и дифференцированности влияющих на нее факторов, множество  $S$  не может быть формализовано линейным математическим аппаратом. Вследствие этого для реализации адаптивных алгоритмов управления структурой энергосети необходимо использовать не только математическое описание объектов, но и эмпирическое знание о природе процессов, происходящих внутри них. Решение данной проблемы сводится к введению модуля эвристического анализа, характеризующего собой модель поведения эксперта в определенной производственной ситуации с использованием операций логического вывода и принятия решений, основанных на базе знаний, как комплекса фактов и правил логического вывода [4, 5].

На основании сделанных выводов была разработана структурная схема контура управления энергосетью предприятия (рис. 1).

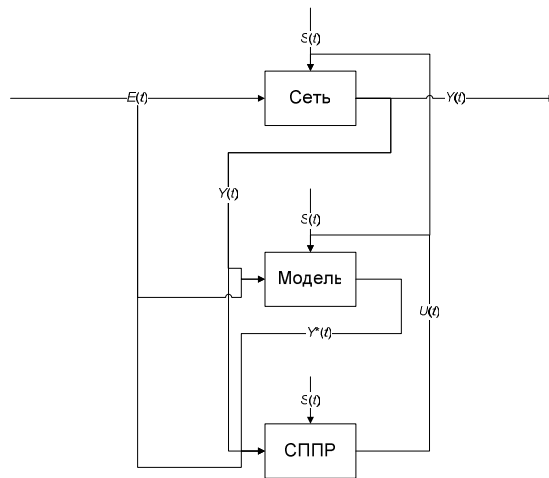


Рис. 1. Структурная схема контура управления энергосетью предприятия

Для структуры потребителя с  $N$  элементами, суммарно потребляющими энергию  $E(t)$  и характеризующимися показателями продуктивности  $Y(t)$ , необходимо выработать управляющее воздействие  $U(t)$ . При этом в процессе формирования управляющего воздействия необходимо учитывать риски  $S(t)$ , моделируя и анализируя изменение показателя продуктивности  $Y(t)$  в зависимости от  $U(t)$ .

### Формирование функциональной схемы автоматизированной системы мониторинга энергопотребления предприятия

Выделив модель математического описания структуры сети предприятия в отдельный элемент контура управления, мы не выносим его за функциональный контур проектируемой системы. Однако в обобщенной функциональной схеме автоматизированной системы мониторинга энергопотребления предприятия включаем модель математического описания в алгоритм обучения модуля эвристического анализа (рис. 2).

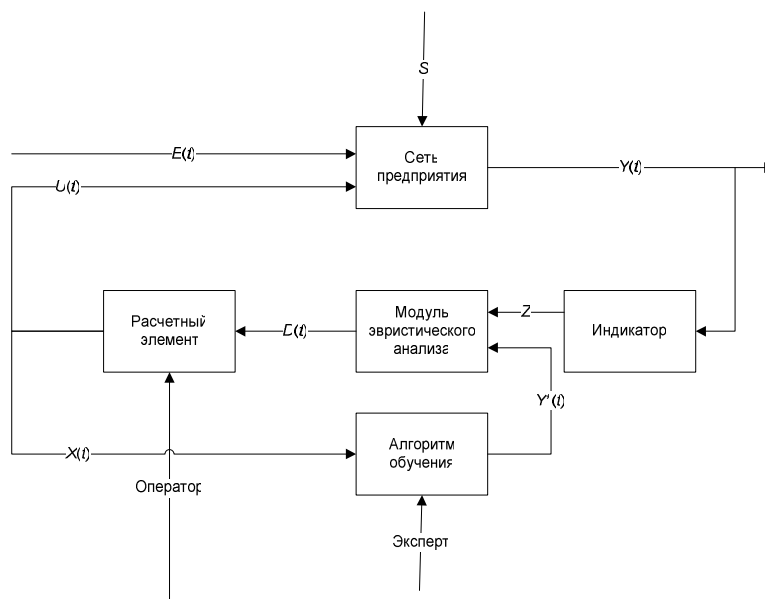


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы мониторинга энергопотребления предприятия

Задача мониторинга энергопотребления предприятия для группы потребителей  $N$  сводится к формированию управляющего воздействия  $D(t)$ , основанного на группе индикаторных функций  $Z$ , инициализированных за фиксированный промежуток времени  $\tau$  с максимальным уровнем производительности  $Y(t)$ . При этом общий случай не учитывает взаимовлияние индикаторных функций друг на друга, а также различную ценность (риск) их инициализации. Вследствие этого задачу формирования управляющего воздействия в общем виде нельзя использовать для группы индикаторных функций, т. к. она не учитывает различную степень риска  $S$  (при различном порядке инициализации индикаторных функций, обладающих различной ценностью).

Для формулирования задачи управляющего воздействия в частном виде выделим входные и выходные параметры для группы потребителей, каждого из потребителей, группы индикаторных функций и каждой из них.

### Задача формирования управляющего воздействия

Нами были определены входные параметры системы мониторинга энергопотребления предприятия. Основными параметрами каждой индикаторной функции  $Z_n$  множества  $Z$  являются:  $P_n$  – цена инициализации функции  $Z_n$ ;  $E_n^z$  – необходимые условия для инициализации функции  $Z_n$ ; взаимовлияние функции  $Z_n$  и остальных функций множества  $Z$ .

Основными параметрами множества функций  $Z$  являются:  $n$  – количество функций во множестве  $Z$ ;  $Q_{\max}$  – максимальная суммарная ценность функции множества  $Z$ .

Основным параметром потребителя  $N_m$  множества  $N$  является его энергоемкость  $\varepsilon_m^r$ , при этом данный параметр зависит от времени работы:  $\varepsilon_m^r = f(t)$ . Дополнительный параметр потребителя – критическое значение энергоемкости  $\varepsilon_m^a$ , при котором он не может эффективно выполнять поставленные задачи, чем вызывает инициализацию функции множества  $Z$ , снижая уровень производительности до критического минимума.

Разделим процесс анализа информации на два основных режима: получение статических и динамических данных.

К статическим данным относятся данные, являющиеся постоянными при изменении инициализируемых функций  $Z$ , т. е. информация о технических параметрах потребителей, параметров взаимодействия между реализуемыми индикаторными функциями.

К динамическим данным относятся данные о поставленных перед группой потребителей индикаторных функциях, анализ которых необходимо произвести автоматически, на основе заданных пользователем показателей производительности и установленных критических значений риска.

Отметим, что входные параметры каждой из функций должны быть проанализированы для выявления взаимодействия между ними. Результат анализа информации строго структурирован и привязан непосредственно к инициализируемой функции. Анализ взаимосвязанных функций, расположенных в единой рабочей зоне, происходит с использованием информации о группе потребителей.

Определим частную задачу общего случая формирования управляющего воздействия: необходимо распределить множество функций  $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$  с определенной ценой из множества  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , соответствующих элементам множества функций  $Z$ , между множеством потребителей  $N = \{N_1, N_2, \dots, N_m\}$ , а также решить задачи с установленным уровнем производительности  $Y = \text{const}$  за отрезок времени  $\tau$ .

Таким образом, множество функций  $Z$  можно представить в виде структуры, учитывающей влияние функций друг на друга и их распределение между потребителями.

Структура множества функций  $Z$  состоит из 5 уровней. Первый – единое недекомпозируемое множество функций с сетевой внутренней структурой, поставленное перед группой потребителей; второй – состояние функций (на данном уровне представлены три подмножества, в которых распределены элементы множества функций  $Z$  в зависимости от состояния: ждущие инициализации, инициализированные неотработанные, инициализированные отработанные); третий – семейство подмножеств целевых функций потребителей; четвертый – семейство подмножеств, выражающих взаимовлияние функций друг на друга; пятый уровень состоит из элементарных функций.

В ходе исследований был проведен анализ и рассмотрены ограничения в форме лингвистических высказываний, которые являются существенными для группы потребителей в процессе функционирования проектируемой системы: любые два потребителя не могут инициализировать одну и ту же функцию; сформированное управляющее воздействие может быть скорректировано в дискретный момент времени, зависящий только от изменения состава группы функций; изменение состава подмножества функций производится при достижении общей суммы цен инициализированных функций к заданному уровню эффективности выполнения; потребитель может инициализировать функции только до тех пор, пока уровень энергоемкости превышает сумму значений параметра критического уровня.

### **Заключение**

Рассмотренные ограничения позволяют перейти от формализации задачи снижения потерь электроэнергии в общем и частном случае к созданию информационной системы учета энергетических потерь предприятия. В процессе осуществления данного перехода необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи: разработать методику построения математической модели; построить математическую модель на основе предложенной методики для реализации системы управления, с выявленными количественными и качественными показателями, характеризующими взаимодействие внутри группы потребителей; синтезировать алгоритм управления при решении множества взаимосвязанных задач в рабочей зоне, позволяющей вырабатывать управляющее воздействие, близкое к оптимальному, на основе множества индикаторных функций; сформировать базу данных для проведения экспериментальных исследований с целью проверки адекватности математической модели и работоспособности алгоритмов; провести анализ и дать оценку эффективности предложенных моделей и алгоритмов управления.

Решение данных задач позволит приблизиться к созданию информационной системы учета энергетических потерь предприятия на основе показаний приборов учета, их анализа, формирования энергетического профиля предприятия, планирования и мониторинга реализации программы повышения энергоэффективности, состоящей из перечня мероприятий по снижению потерь, расчета энергетического и экономического эффекта, а также инвестиционных показателей энергетической программы.

### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Проталинский О. М. Система поддержки принятия решений для операторов слабоформализуемых ТП / О. М. Проталинский, И. А. Щербатов // Автоматизация в промышленности. 2009. № 7. С. 43–47.
2. Немчинов Д. В. Система принятия управленческих решений по снижению влияния субъективного фактора как причины аварийной ситуации / Д. В. Немчинов, О. М. Проталинский // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 2. С. 43–48.
3. Проталинский О. М. Система поддержки принятия управленческих решений по снижению рисков аварийных ситуаций на промышленных объектах / О. М. Проталинский, Д. В. Немчинов // Автоматизация в промышленности. 2010. № 3. С. 13–16.
4. Тарасовский В. Г. Применение информационно-аналитических систем для управления энергоэффективностью на металлургических предприятиях / В. Г. Тарасовский, И. С. Петухов // URL: [http://www.gce.ru/press/press-release/primenenie\\_informacionnoanaliticheskikh\\_sistem/](http://www.gce.ru/press/press-release/primenenie_informacionnoanaliticheskikh_sistem/) (дата обращения: 01.12.2014).
5. Проталинский О. М. Распознавание предаварийных ситуаций на технологических объектах управления с использованием нечетких множеств / О. М. Проталинский, А. В. Филоненко // Изв. высш. учеб. завед. Северо-Кавказ. регион. Сер.: Технические науки. 2003. № 3. С. 19–20.

Статья поступила в редакцию 9.12.2014,  
в окончательном варианте – 12.01.2015

### **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Копин Алексей Михайлович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры «Прикладная информатика в экономике»; [kopin.a.m@astra-best.ru](mailto:kopin.a.m@astra-best.ru).

**Проталинский Игорь Олегович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; ассистент кафедры «Автоматизация технологических процессов»; protalinskii.i.o@astra-best.ru.

**Медников Николай Алексеевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры «Прикладная информатика в экономике»; Nicolay\_mednikov@mail.ru.



*A. M. Kopin, I. O. Protalinskiy, N. A. Mednikov*

## FORMALIZATION OF THE PROBLEM OF OPTIMIZATION OF POWER LOSSES ON THE BASIS OF HEURISTIC ANALYSIS

**Abstract.** The generalized function chart of the system of support of decision-making based on the module of the heuristic analysis is offered. Now there is a number of highly specialized information systems, however there is no possibility of the simultaneous solution of tasks of the direction "Energy efficiency", and also carrying out the full multiple-factor analysis of information necessary for decision-making about implementation of the program of decrease in losses and the analysis of the power profile of the enterprise. The power network of the enterprise as an object of management is described. The task of minimization of losses of energy resources in the technical network of the consumer at invariable performance level is generally and specifically set. The block diagram of management of the power network of the enterprise and also a function chart of the automated system of monitoring of energy consumption of the enterprise is created. The problems of formation of the operating influence are defined. The results of the analysis allow generally and specifically to pass from formalization of the problem of decrease in losses of the electric power to creation of the information system of the accounting of power losses of the enterprise.

**Key words:** energy saving, expert systems, system of support of decision-making, energy efficiency.

### REFERENCES

1. Protalinskii O. M., Shcherbatov I. A. Sistema podderzhki priniatiia reshenii dlia operatorov slaboformalizuemyykh TP [System of support of decision-making for operators of badly formalized TP]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2009, no. 7, pp. 43–47.
2. Nemchinov D. V., Protalinskii O. M. Sistema priniatiia upravlencheskikh reshenii po snizheniiu vliianiia sub"ektivnogo faktora kak prichiny avariinoy situatsii [System of managerial decision making on decrease in influence of subjective factor as a reason of emergent situations]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naiia tekhnika i informatika*, 2011, no. 2, pp. 43–48.
3. Protalinskii O. M., Nemchinov D. V. Sistema podderzhki priniatiia upravlencheskikh reshenii po snizheniiu riskov avariinykh situatsii na promyshlennykh ob"ektakh [System of managerial decision making on decrease in risks of emergent situations at the industrial enterprises]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2010, no. 3, pp. 13–16.
4. Tarasovskii V. G., Petukhov I. S. *Primenenie informatsionno-analiticheskikh sistem dlia upravleniia energoeffektivnost'iu na metallurgicheskikh predpriiatiakh* [Application of information and analytical systems to control energy efficiency at the metallurgic enterprises]. Available at: [http://www.gce.ru/press/press-release/primenenie\\_informacionnoanaliticheskikh\\_sistem/](http://www.gce.ru/press/press-release/primenenie_informacionnoanaliticheskikh_sistem/) (accessed: 01.12.2014).
5. Protalinskii O. M., Filonenko A. V. Raspoznavanie predavariinykh situatsii na tekhnologicheskikh ob"ektakh upravleniia s ispol'zovaniem nechetkikh mnozhestv [Detection of preemergent situations at the technological objects of management using the fuzzy sets]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2003, no. 3, pp. 19–20.

The article submitted to the editors 9.12.2014,  
in the final version – 12.01.2015

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Kopin Alexey Mikhailovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department "Applied Informatics in Economics"; kopin.a.m@astra-best.ru.

**Protalinskiy Igor Olegovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant of the Department "Automation of Technological Processes"; protalinskii.i.o@astra-best.ru.

**Mednikov Nikolay Alekseevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department "Applied Informatics in Economics"; kopin.a.m@astra-best.ru.

