УДК 697.34

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-6-164-171

© В. К. Аверьянов, д-р техн. наук, профессор,
советник генерального директора

© V. K. Averyanov, Dr. Sci. Tech., Professor,
Advisor of the CEO

© В. Н. Толмачев, д-р техн. наук, ст. научн. сотрудник,
заместитель директора Научно-технического центра
(АО «Газпром промгаз»)

© V. N. Tolmachev, Dr. Sci. Tech., senior research worker,
Deputy Director of the Scientific and Technical Center
(JSC "Gazprom Promgaz")

E-mail: V.Averyanov@spb.oao-promgaz.ru,
V.Tolmachev@spb.oao-promgaz.ru

E-mail: V.Averyanov@spb.oao-promgaz.ru,
V.Tolmachev@spb.oao-promgaz.ru

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ В СИСТЕМАХ ТЕПЛО- И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

ADAPTIVE CONTROL IN HEAT AND ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Представлены результаты исследования функционирования автономного энергетического комплекса (АЭК) с точки зрения использования принципа адаптивного управления. Разработано алгоритмическое обеспечение решения задач интеллектуального управления энергетическим оборудованием АЭК. Созданы имитационные модели систем интеллектуального управления, воспроизводящие основные режимы функционирования источников, распределительных сетей и потребителей в составе АЭК. Определены перспективные направления совершенствования систем интеллектуального управления энергетическим оборудованием АЭК.

Ключевые слова: теплоснабжение, энергоэффективность, адаптивное управление, система автоматического регулирования, автономный энергетический комплекс.

The article presents the results of the research on the autonomous energy complex (AEC) functioning through using the concept of adaptive control. There has been developed algorithmic provision for solving tasks of intelligent control of AEC equipment. Simulation models of intelligent control systems reproducing the main functioning modes of producers, distribution circuits and consumers in AEC structure have been created. High-potential directions of improving intelligent control systems of AEC power engineering equipment have been identified.

Keywords: heat supply, energy efficiency, adaptive control, automatic regulation system, autonomous energy complex.

Как известно, наша страна вышла на путь энергоэффективности. В 2009 году был принят Федеральный закон «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» № 261-ФЗ. Далее были разработаны государственная программа «Энергосбережение и повышение энергоэффективности на период до 2020 года» и ряд других нормативно-правовых документов по формированию в стране энергоэффективной среды жизнедеятельности.

Основными (конечными) задачами реализации комплекса мероприятий и программ по энергосбережению и повышению энергоэффективности здесь являются:

- обеспечение финансовой устойчивости экономики населенного пункта за счет снижения бюджетных расходов на энергоресурсы и на развитие энергетических объектов;
- снижение, за счет внедрения энергосберегающих технологий, расходов населения и предпринимателей на энергоресурсы;

- повышение экологической и энергетической безопасности.

Проблема энергосбережения в зданиях, повышения энергоэффективности и надежности функционирования инженерной инфраструктуры городов и населенных пунктов носит комплексный характер и связана с необходимостью решения значительного числа задач [1, 2] на всех этапах жизненного цикла системы «здания – инженерные сети – источники энергоресурсов (воды, газа, тепловой и электрической энергии)».

За последнее десятилетие научно-технической общественностью и исполнительной властью страны выполнен большой объем работ по вопросам, которые должны быть решены в процессе реформирования теплоснабжения. После широкого общественного обсуждения приняты Федеральный закон РФ «О теплоснабжении» № 190-ФЗ, Постановление Правительства РФ № 154 «О правилах разработки схем теплоснабжения» и др.

При развитии систем теплоснабжения основными постулатами являются [2–4]:

- сохранение сложившейся инфраструктуры (ТЭЦ и тепловые сети) в теплоплотных районах города с одновременным повышением технического уровня и внедрением энергоэффективных технологий;

- создание для локальных зон и районов с малой теплоплотностью современных энергоэффективных, в том числе автономных источников с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии, возобновляемых источников энергии и гибридных систем на их основе.

Следует отметить, что идеи энергоэффективности, спасительные в нынешней ситуации для нашей северной страны, комплексно пока в недостаточной мере нашли массовое практическое воплощение в строительной отрасли. По-прежнему вопросам развития способов энергосбережения в элементах зданий уделяется гораздо больше внимания, чем уменьшению потребления энергоресурсов в целом, с учетом эффективности функционирования теплоэнергетического и теплопотребляющего оборудования.

Ранее теплопотребляющие установки многоквартирных домов создавались [5, 6] для сообщества жильцов, каждый из которых в отдельности не мог (да и в настоящее время чаще всего

не может) влиять на процесс фиксации объемов теплопотребления с регулированием в широком диапазоне температуры воздуха в отапливаемых помещениях (для комфорта и энергосбережения). Внедрение стимулов экономии тепла, в первую очередь для потребителей, здесь упирается в неприспособленность существующих систем к индивидуальному регулированию с определением эффектов поквартирного энергосбережения. Существующая тенденция увеличения тарифов на тепловую и электрическую энергию одновременно с невозможностью использования экономических стимулов повышения энергоэффективности поэлементно в системе «генерация, транспортировка, распределение и квартирное теплопотребление энергии» может привести в дальнейшем к высокой плате за энергоресурсы и, как следствие, к снижению качества жизни населения.

Качество и экономичность функционирования технических систем здания как альтернатива возрастающим затратам формируются [1, 7, 8]:

- взаимосвязью технических систем, программируемостью режимов их взаимного функционирования;

- мониторингом состояния оборудования и систем, визуализацией необходимых параметров (в том числе технологических для производственных и общественных зданий);

- распределенностью управления техническими системами (городской, квартальный, домовый, квартирный и локальный уровни);

- безбумажными технологиями расчетов с поставщиками и эксплуатационными организациями;

- использованием энергии буферных зон (энергии солнца, ветра, грунтового массива);

- утилизацией вторичных энергетических ресурсов;

- применением энергоресурсосберегающей техники, оборудования и ограждающих конструкций с высокими теплозащитными свойствами;

- широким внедрением принципов адаптивного управления интеллектуальными системами энергоснабжения зданий, в том числе с использованием возобновляемой энергии.

Реализация приведенного выше перечня мероприятий способствует сокращению потре-

ния по сравнению с нормативными показателями на 15–40 %, что позволяет строить в треугольнике «комфорт – безопасность – энергосбережение» бизнес-модели окупаемости дополнительных затрат на создание энергоэффективной среды жизнедеятельности.

Комплексный подход к построению эффективных интеллектуальных гибридных энергосистем позволяет снизить максимум нагрузки на 10–20 %, электропотребление — на 5–15 %, существенно увеличить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) установок возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Основная часть эффектов здесь проявляется как результат активного регулирования энергопотребления и воздействий потребителя в интеллектуальной энергосистеме на основе принципов адаптивного управления.

Рассмотрим применение принципов адаптивного управления на примере управления режимами энергопотребления в автономном энергетическом комплексе (АЭК) с ВИЭ. Эффективное функционирование здесь заключается в обеспечении потребителей энергией в течение расчетного периода времени в режиме максимальной загрузки генераторов на базе ВИЭ, и наоборот — для установок на традиционном топливе (т. е. $\text{КИУМ}_{\text{ВИЭ}} \rightarrow 1$, $\text{КИУМ}_{\text{трад}} \rightarrow 0$). Таким образом, последние должны использоваться преимущественно для покрытия пиковой нагрузки, встречающейся незначительный период времени в течение года (как правило, в пределах 10–20 % годовой продолжительности энергопотребления). Итоговым показателем эффективности может являться коэффициент замещения топлива за счет использования возобновляемой энергии, значение которого в расчетный период должно стремиться к максимуму ($\varphi_{\text{год}} \rightarrow 1$).

В основе управления режимами энергосистемы лежат два способа:

1. Первый способ заключается в изменении режимов выдачи мощности (P_i) и энергии под нужды потребителей (Q_i), когда ($P_i \rightarrow Q_i$; $Q_i \rightarrow Q_{\text{расч}}$). В данном случае предполагается, что все энергопотребляющие установки могут работать в любом режиме и в любой момент времени без взаимосвязи и вне зависимости от эффективности выработки энергии (использования топлива) на АЭК. Таким об-

разом, потребительские установки работают в условиях статических внешних ограничений со стороны энергоисточника или сети ($P_i = P_{\text{расч}} = P^{\text{ВИЭ}} + P^{\text{трад}} + P^{\text{аккумулятор}} = \text{const}$).

2. Второй способ предполагает изменение режимов энергопотребления в соответствии с изменяющимися ограничениями со стороны энергоисточника или сети ($Q_i \rightarrow P_i$; $P_i = \text{var}$; $P_i^{\text{трад}} \rightarrow 0$). Для реализации данного способа требуется большой объем сведений по энергопотребляющим установкам, в том числе сведения по приоритетности их работы, уставкам и аккумулярующим способностям.

На рис. 1 представлен пример управления суточными режимами энергопотребления объекта при изменяющемся лимите мощности АЭК.

Управлением режимами энергопотребления достигается выравнивание графиков нагрузки под заданное максимальное значение оптимальной мощности P_i и минимально допустимое значение энергопотребления $Q_i^{\min} \leq Q_i \leq P_i$. При этом использование пиковых мощностей либо исключается в полном объеме, либо снижается продолжительность их функционирования, а также предотвращается перегрузка системы (рис. 2).

Программная реализация изложенного способа регулирования позволяет ограничить применение пиковых мощностей АЭК и избежать аварийных ситуаций из-за перегрузки энергосистемы. Кроме того, оценка диапазонов регулирования и допустимых временных сдвигов энергетической нагрузки является важной задачей на этапе проектирования АЭК, так как позволяет оптимизировать установленные мощности и их соотношения при применении генераторов энергии различного типа и аккумуляторов энергии.

Основные необходимые условия реализации управления потребительскими нагрузками здесь следующие:

1. Наличие (задание) информации по каждому энергопотребляющему устройству или группе устройств: приоритетность работы; параметры (уставки), диапазоны регулирования; энергетические и теплофизические характеристики; технологические режимы (допустимые и оптимальные), возможные временные сдвиги и их продолжительности; математическое описание законов изменения обеспечиваемых целевых параметров (уставок).

Рис. 1. Пример управления режимами энергопотребления при изменяющемся лимите мощности на АЭК: а — $P_l = 105$ кВт; б — $P_l = 90$ кВт

2. Прогнозирование с использованием математических моделей, включая статистический анализ: режимов работы технологического оборудования; режимов работы персонала, влияющих на энергопотребление (время присутствия в помещениях, использования оборудования и др.); энергетических режимов объектов; режимов генерации энергии от ВИЭ.

3. Адаптивное управление и/или выдача рекомендательных сигналов по использованию энергопотребляющих установок и принятия решений по сдвигу или изменению нагрузки с целью минимизации суммарных затрат на энергопотребление при сохранении требуемого качества энергоснабжения.

Одной из наиболее важных задач, решаемых интеллектуальной системой энергоснабжения, является обеспечение ее адаптивности для достижения максимальных технико-экономических показателей.

Как известно [9, 10, 14], адаптивные системы — это такие системы, которые обладают способностью при изменении возмущающих воздействий перестраивать свою структуру и (или) изменять параметры структурных связей таким образом, что переход к новому состоянию происходит с наименьшими потерями энергии и за минимально возможное для данной системы время.

Так, например, система автоматического регулирования (САР) гибридной системы энергообеспечения с ветроустановками (ВЭУ) автономно-

го объекта (здания или сооружения) фактически должна обеспечить управление тремя каналами передачи энергии:

1. Преобразование энергии ветра в электрическую энергию. Оптимизация данного канала достигается за счет управления нагрузкой на ВЭУ таким образом, чтобы частота вращения ВЭУ соответствовала оптимальной для данного скоростного напора ветра [11, 19]:

$$\omega_B = \frac{Z_H \cdot v}{R}, \quad (1)$$

где Z_H и R — соответственно номинальное число модулей и радиус ветроколеса.

2. Преобразование электрической энергии, вырабатываемой ВЭУ, с нестабильными параметрами в требуемую по качеству электрическую энергию в канале источника бесперебойного питания (ИБП).

3. Преобразование электрической энергии, вырабатываемой ВЭУ, с нестабильными параметрами в тепловую энергию в электробойлере или электрокалорифере.

Таким образом, в идеальном случае САР, которая управляет потоками энергии в трех указанных каналах, должна представлять собой адаптивную систему, в которой на основе моделирования энергетических процессов вырабатывается управляющее воздействие, оптимальное для данного момента времени и обеспечивающее общую оптимальную структуру энергетического баланса в целом [12, 20]. Основным ограничением при решении этой задачи является величина

Рис. 2. Пример энергообеспечения потребителей от АЭЖ без управления режимами энергопотребления (ДЭС — дизельная электростанция; АБ — аккумуляторная батарея)

капитальных затрат, отнесенная к достигаемому положительному эффекту [15–18]. Для задания цели адаптивного управления используются оценочные функции:

$$J(t) = J(e(t)), \quad (2)$$

где $J(e) = q(e(t))$ — некоторая выпуклая функция, часто $J(e) = e^2$, $e(t)$ — ошибка, малость которой соответствует достижению цели управления. Выражение ошибки зависит от назначения системы управления [11].

Обширный класс адаптивных систем составляют системы с эталонной моделью, в которых желаемое движение задается эталонной моделью, являющейся физическим устройством, описываемым уравнениями [13]:

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \mathbf{A}_M \mathbf{x}_M + \mathbf{b}_M g; \mathbf{y}_M = \mathbf{d}_M \mathbf{x}_M, \quad (3)$$

либо в общем случае нелинейным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}}_M = \Phi_M(\mathbf{x}_M, g); \mathbf{y}_M = \mathbf{w}_M(\mathbf{x}_M), \quad (4)$$

в которых $\mathbf{x}_M$ — n_M -мерный вектор переменных состояния эталонной модели; $\mathbf{A}_M$ — заданная матрица чисел; $\mathbf{b}_M, \mathbf{d}_M$ — заданные векторы чисел, которые определяются с использованием обычных методов синтеза. Это относится и к вектор-функции Φ_M и функции $\mathbf{w}_M$. Выход $\mathbf{y}_M(t)$ эталонной модели описывает желаемое движение (цель управления) системы при заданном (измеряемом) задающем воздействии $g(t)$. Отклонение от желаемого движения [13]

$$e(t) = y(t) - y_M(t); e(k+1) = y(k+1) - y_M(k+1). \quad (5)$$

Зависимость оценочной функции (критерия качества) (2) от ошибки $e(t)$ принимается различной в зависимости от объема информации

о внешних возмущениях и помехах, действующих на объект.

Идентификационный и прямой алгоритмы адаптивного управления описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_p &= \Phi_p(\mathbf{x}_p, y, g, \beta); u = \mathbf{w}_p(\mathbf{x}_p, y, \beta); \\ \mathbf{x}_p(t_0) &= \mathbf{x}_p^{(0)}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\dot{\beta} = \gamma(\beta, y, u, g), \beta(t_0) = \beta^{(0)}, \quad (7)$$

где $\beta(t)$ — n_β -мерный вектор настраиваемых параметров регулятора (в случае идентификационного алгоритма $\beta(t)$ является оценкой вектора неопределенных параметров α); Φ_p, γ — n_p - и n_β -мерные вектор-функции своих аргументов, подлежащие, как и функции $\mathbf{w}_p$, определению исходя из заданных целей управления.

Уравнения (6) описывают алгоритм работы регулятора, а уравнения (7) — алгоритм адаптации.

На рис. 3 представлена структурная схема системы автоматического регулирования адаптивной системы энергообеспечения автономного объекта с ВЭУ. Управляющее устройство САР состоит из адаптера и регуляторов Р1...Р5. В составе программного обеспечения адаптера САР имеются математические модели основных каналов передачи электрической и тепловой энергии — ВЭУ, САЭ и САТ.

Задача синтеза адаптивного регулятора состоит в определении алгоритма регулирования (6) и алгоритма адаптации (7), таких чтобы для любого вектора чисел $\alpha \in \Omega_\alpha$ и любых начальных условий $\mathbf{x}^{(0)}, \mathbf{x}_p^{(0)}, \beta^{(0)}$ достигалась цель управления.

При формулировке задачи синтеза подразумевается, что в случае прямого алгоритма адаптивного управления уравнение (7) обладает свойством

$$\lim \beta(t) = \beta^*, \quad (8)$$

где β^* — вектор чисел, такой, что регулятор

$$\mathbf{x}_p = \Phi_p(\mathbf{x}_p, y, g, \beta^*);$$

$$u = \mathbf{w}_p(\mathbf{x}, y, \beta^*); \mathbf{x}_p(t_0) = \mathbf{x}_p^{(0)} \quad (9)$$

совпадает с регулятором, который получился бы, если решать задачу синтеза регулятора для объекта, в котором вектор α равен истинному значению α^* .

В случае идентификационного алгоритма управления решения (7) обладают свойством

Рис. 3. Структурная схема САР СЭО автономного объекта с ВЭУ: ЭЭ — электрическая энергия; ТЭ — тепловая энергия; БН — балластная нагрузка; В — выпрямитель; И — инвертор; СЭС — система электроснабжения; ЭБ (ЭК) — электробойлер (электрокалорифер); НА — насосный агрегат; СТС — система теплоснабжения; УУ — управляющее устройство

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \beta(t) = \alpha^* \quad (10)$$

В кооперации с ведущими предприятиями страны ОАО «Авангард» и АО «Газпром промгаз» проводят НИОКР по созданию информационных и автоматизированных систем и программного обеспечения, интегрированных в единые платформы систем интеллектуального управления с целью повышения эффективности функционирования автономных энергетических комплексов, в том числе с возобновляемыми и инновационными источниками энергии различных энергетических объектов.

Выводы

1. Формирование энергоэффективной среды жизнедеятельности с помощью существующих систем энергоснабжения возможно при их модернизации с использованием современных разработок в области интеллектуального управления.

2. Существующий высокий уровень развития вычислительной техники и технологий передачи данных позволяет за счет внедрения интеллектуального управления спросом и генерацией

энергии существенно повысить эффективность работы энергетических систем.

3. Наличие внешних (температура наружного воздуха и скорость ветра) и внутренних (изменение тепловых и электрических нагрузок) возмущающих воздействий на автономный объект ограниченной мощности приводит к необходимости применения на таких объектах энергокомплексов, обладающих свойствами адаптивности, с целью минимизации потерь энергетических и других ресурсов и сокращения времени перехода системы на новый энергетический уровень.

4. Для максимального использования адаптивных свойств источников энергии и потребителей автономного объекта представляется целесообразным применение САР кибернетического типа с программным обеспечением, учитывающим вероятностный характер поступления энергоресурсов, резкопеременный характер графиков тепловых и электрических нагрузок и изменение параметров объекта и источников энергии.

Библиографический список

1. Аверьянов В. К., Мележик А. А., Вавилов Д. О. Современные технологии управления потребительским спросом в системе генерация — транспорт — потребление энергии // Энергетик. 2014. № 2. С. 28–30.
2. Аверьянов В. К., Юферев Ю. В., Мележик А. А. Энергоэффективная среда жизнедеятельности: направления развития // Газинформ. 2016. № 2 (52). С. 16–23.
3. Аверьянов В. К., Юферев Ю. В., Лисицкий Э. Н. Мероприятия по формированию энергоэффективной среды жизнедеятельности при разработке схемы теплоснабжения г. Санкт-Петербург // Газинформ. 2016. № 4 (54). С. 30–36.
4. Аверьянов В. К., Лисицкий Э. Н., Юферев Ю. В. О направлениях повышения эффективности централизованного теплоснабжения крупных городов // Новosti теплоснабжения. 2015. № 9 (181). С. 29–34.
5. Чистович С. А., Аверьянов В. К., Темпель Ю. Я., Быков С. И. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления. Л.: Стройиздат, 1987. 247 с.
6. Чистович С. А., Харитонов В. Б. Автоматизированные системы теплофикации, теплоснабжения и отопления. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2008. 304 с.
7. Акиев Р. С. и др. Каталог технических решений и практических рекомендаций по энергосбережению и повышению энергетической эффективности зданий и сооружений. М.: НОСТРОЙ, 2014. 139 с.
8. Аверьянов В. К., Карасевич А. М., Федяев А. В. Системы малой энергетики: современное состояние и перспективы развития. Т. 1. М.: ИД «Страховое Ревю», 2008. 466 с.
9. Александров А. Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высшая школа, 1989. 263 с.
10. Тертычный-Даури В. Ю. Адаптивная механика. М.: Наука-Физматлит, 1998. 480 с.
11. Толмачев В. Н., Орлов А. В., Булат В. А. Эффективное использование энергии ветра в системах автономного энергообеспечения / под общ. ред. А. В. Орлова. СПб.: ВИТУ, 2002. 203 с.
12. Толмачев В. Н., Кирюхин С. Н., Сибгатуллин А. Р., Пулик А. А., Шиманская А. О. Разработка методологического подхода к оптимальному выбору возобновляемых источников энергии для электро-снабжения вдольтрассовых потребителей МГ // Газовая промышленность. 2015. № S (724). С. 112–117.
13. Кузнецова В. Л., Раков М. А. Самоорганизация в технических системах. Киев: Наукова думка, 1987. 200 с.
14. Коган А. Б., Наумов Н. В., Режабек В. Г., Чораян О. Г. Биологическая кибернетика: учеб. пособие для университетов / под ред. А. Б. Когана. М.: Высшая школа, 1977. 408 с.

15. Мееров В. М. Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности. М.: Наука, 1959. 284 с.

16. Емельянов С. В. Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.

17. Кухтенко А. И. Проблема инвариантности в автоматике. Киев: Наукова думка, 1963. 376 с.

18. Толмачев В. Н., Кирюхин С. Н., Журавский М. А., Сибгатуллин А. Р. Оптимизация структуры энергетических комплексов на основе имитационного моделирования // Газовая промышленность. 2013. № 11/698. С. 52–56.

19. Плотникова Т. В., Шакарян Ю. Г. Режимы работы сетевой ветроэлектрической установки с асинхронизированным генератором // Изв. АН «Энергетика». 1997. № 3. С. 18–29.

20. Майков И. Л., Директор Л. Б. Решение задач оптимизации и управления гибридными энергетическими комплексами в структуре распределенной генерации // Управление большими системами: сб. тр. Вып. 35. М.: ИПУ РАН, 2012. С. 250–264.

References

1. Aver'yanov V. K., Melezhik A. A., Vavilov D. O. *Sovremennye tekhnologii upravleniya potrebitel'skim sprosom v sisteme generatsiya – transport – potreblenie ehnergii* [Modern technologies of consumer demand control in the “generation – transport – energy consuming” system]. *Ehnergetik – Power engineering specialist*, 2014, no. 2, pp. 28–30.
2. Aver'yanov V. K., Yuferev Yu. V., Melezhik A. A. *Ehnergoehfektivnaya sreda zhiznedeyatel'nosti: napravleniya razvitiya* [Energy efficient environment of activity: directions of development]. *Gazinform – Gasinform*, 2016, no. 2 (52), pp. 16–23.
3. Aver'yanov V. K., Yuferev Yu. V., Lisitskiy Eh. N. *Meropriyatiya po formirovaniyu ehnergoehfektivnoy sredy zhiznedeyatel'nosti pri razrabotke skhemy teplosnabzheniya g. Sankt-Peterburg* [Measures on formation of the energy efficient living environment at development of the heat supply system in St. Petersburg]. *Gazinform – Gasinform*, 2016, no. 4 (54), pp. 30–36.
4. Aver'yanov V. K., Lisitskiy Eh. N., Yuferev Yu. V. *O napravleniyakh povysheniya ehfektivnosti tsentralizovannogo teplosnabzheniya krupnykh gorodov* [About the directions of increasing the centralized heat supply efficiency in big cities]. *Novosti teplosnabzheniya – Heat Supply News*, 2015, no. 9 (181), pp. 29–34.
5. Chistovich S. A., Aver'yanov V. K., Tempel' Yu. Ya., Bykov S. I. *Avtomatizirovannye sistemy teplosnabzheniya i otopleniya* [Automated systems of heat supply and heating]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1987, 247 p.

6. Chistovich S. A., Kharitonov V. B. *Avtomati-zirovannye sistemy teplofikatsii, teplosnabzheniya i otopleniya* [Automated systems of cogeneration, heat supply and heating]. St. Petersburg, AVOK Severo-Zapad Publ., 2008, 304 p.
7. Akiev R. S., et al. *Katalog tekhnicheskikh resheniy i prakticheskikh rekomendatsiy po ehnergosberezheniyu i povysheniyu ehnergeticheskoy ehffektivnosti zdaniy i sooruzheniy* [Directory of technical solutions and practical recommendations about energy saving and increase in energetic efficiency of buildings and constructions]. Moscow, NOSTROY Publ., 2014, 139 p.
8. Aver'yanov V. K., Karasevich A. M., Fedyaev A. V. *Sistemy maloy ehnergetiki: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya* [Systems of small-scale power generation: the current state and perspectives of development]. Vol. 1. Moscow, Strakhovoe Revyu Publ., 2008, 466 p.
9. Aleksandrov A. G. *Optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Optimum and adaptive systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989, 263 p.
10. Tertychnyy-Dauri V. Yu. *Adaptivnaya mekhanika* [Adaptive mechanics]. Moscow, Nauka-Fizmatlit Publ., 1998, 480 p.
11. Tolmachev V. N., Orlov A. V., Bulat V. A. *Ehffektivnoe ispol'zovanie ehnergii vetra v sistemakh avtonomnogo ehnergoobespecheniy* [Effective use of wind power in the systems of independent power supply]. Ed. by Orlov A. V. St. Petersburg, VITU Publ., 2002, 203 p.
12. Tolmachev V. N., et al. *Razrabotka metodologicheskogo podkhoda k optimal'nomu vyboru vozobnovlyaemykh istochnikov ehnergii dlya ehlektrosnabzheniya vdol'trassovykh potrebiteley MG* [Development of methodological approach to the optimum selection of renewables for electrical power supply for consumers of MG located along-the-highway]. *Gazovaya promyshlennost' – Natural gas industry*, 2015, no. S (724), pp. 112–117.
13. Kuznetsova V. L., Rakov M. A. *Samoorganizatsiya v tekhnicheskikh sistemakh* [Self-organization in technical systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 200 p.
14. Kogan A. B., Naumov N. V., Rezhbek V. G., Chorayan O. G. *Biologicheskaya kibernetika. Ucheb. posobie dlya universitetov* [Biological cybernetics. Teaching manual for universities]. Ed. by Kogan A. B. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1977, 408 p.
15. Meerov V. M. *Sintez struktur sistem avtomaticheskogo regulirovaniya vysokoy tochnosti* [Synthesis of the structures of automatic control systems of high precision]. Moscow, Nauka Publ., 1959, 284 p.
16. Emel'yanov S. V. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya s peremennoy strukturoy* [The systems of automatic control with variable structure]. Moscow, Nauka Publ., 1967, 336 p.
17. Kukhtenko A. I. *Problema invariantnosti v avtomatike* [Invariance problem in automatic equipment]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1963, 376 p.
18. Tolmachev V. N., Kiryukhin S. N., Zhuravskiy M. A., Sibgatullin A. R. *Optimizatsiya struktury ehnergeticheskikh kompleksov na osnove imitatsionnogo modelirovaniya* [Optimization of the energetic complexes structure on the basis of simulation modeling]. *Gazovaya promyshlennost' – Gas industry*, 2013, no. 11/698, pp. 52–56.
19. Plotnikova T. V., Shakaryan Yu. G. *Rezhimy raboty setevoy vetroehlektricheskoy ustanovki s asinkhronizirovannym generatorom* [Operation modes of the network wind electric stations with asynchronized generators]. *Ehnergetika – Power Engineering*, 1997, no. 3, pp. 18–29.
20. Maykov I. L., Direktor L. B. *Reshenie zadach optimizatsii i upravleniya gibridnymi ehnergeticheskimi kompleksami v strukture raspredelennoy generatsii* [Solution of the problems of optimization and management of hybrid power complexes in the structure of distributed generation]. *Upravlenie bol'shimi sistemami* [Management of big systems]. Coll. of sci. works, iss. 35. Moscow, IPU RAN Publ., 2012, pp. 250–264.