

УДК 621.484

Стоянов Николай Иванович, Смирнов Станислав Сергеевич,
Стоянов Арсений Геннадьевич

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОБОСОБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Предложена математическая модель управления системой комплексного энергоснабжения обособленных объектов от возобновляемых источников энергии. Математическая модель построена с использованием теории графов и позволяет определить критические пути графа для двух периодов – теплого и холодного. На основе решения системы дифференциальных уравнений может быть определена мощность резервного источника энергии и потребление энергии в «пиковых» режимах.

Ключевые слова: комплексное энергоснабжение обособленных объектов, возобновляемые источники энергии, альтернативная энергетика.

Nikolai Stoyanov, Stanislav Smirnov, Arsenii Stoyanov

MATHEMATICAL MODEL OF CONTROL SYSTEM OF COMPLEX POWER SUPPLY OF SEPARATE OBJECTS FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES

A mathematical model of control system of complex power supply of separate objects from renewable energy sources. A mathematical model is constructed using graph theory and allows to determine the critical path graph for two periods – warm and cold. On the basis of the solution of the system of differential equations can be defined the capacity of the reserve source of energy and energy consumption in the «peak» modes.

Key words: comprehensive supply of separate objects, renewable energy, alternative energy.

Как показали теоретические исследования, в летнее время использование солнечной энергии осуществляется только в целях горячего водоснабжения, и потенциал солнечного коллектора недоиспользуется, а в зимнее время потенциала солнечных коллекторов недостаточно для систем отопления [12]. Так как одни виды энергопотребления имеют ярко выраженные колебания по месяцам года (отопление, вентиляция и кондиционирование), а другие – по часам суток (электроснабжение и горячее водоснабжение), то установка для использования возобновляемых источников энергии должна иметь резерв мощности для покрытия «пиковых» нагрузок.

Нами был проведен анализ методик математического моделирования систем теплоснабжения.

В работе [6] рассмотрены вопросы разработки математического аппарата для оптимизации систем теплоснабжения на основе общей методологии математического моделирования систем теплоснабжения, позволяющей минимизировать затраты на генерацию и транспортирование тепловой энергии. В работе рассмотрена система теплоснабжения зданий как множества объектов с набором свойств и связей между ними. При этом каждый объект работает как составляющая часть системы для достижения единой цели. Система теплоснабжения (СТС) определяется кортежем $S_{def} = \langle T, Q, R, Z, SR, \Delta t \rangle$, где T, Q, R, Z, SR – множества элементов, их свойств, связей, целей и соответствующих сред.

Система S функционирует при едином множестве целей, включающем: Z_1 – повышение температуры воздуха в помещениях до заданного уровня к заданному моменту времени; Z_2 – поддержание температуры в помещениях на заданном уровне до заданного момента времени; Z_3 – понижение температуры в помещениях до заданного уровня начиная с определенного момента времени. Достижение отмеченных целей должно обеспечиваться при минимуме приведенных затрат на капитальные вложения и эксплуатационные расходы в СТС.

Множество SR включает в себя значения температур внешних сред $СТС$, окружающих элементы системы, считающиеся постоянными.

Для достижения первой и третьей целей используются переходные режимы; для поддержания в помещении постоянной температуры T – стационарный режим.

Математические модели системы теплоснабжения строятся на основе осреднения уравнений теплопроводности и уравнений тепловых балансов. В качестве параметров режимов используются осредненные значения температуры теплоносителя в элементах системы.

Для каждой из нагрузочных подсистем безразлично, получает ли она теплоноситель с требуемыми параметрами от централизованного или от автономного источника. При этом предполагается, что автономный источник располагается на месте централизованного и обеспечивает требуемые характеристики теплоносителя. Данный подход позволяет декомпозировать исходную систему на n независимых нагрузочных подсистем с n автономными источниками и анализировать устойчивость отдельных подсистем с последующей проверкой, устойчивость всей системы по корням характеристического многочлена.

В работе [15] применительно к структурно-функциональным моделям возобновляемых источников энергии используется теория графов.

Также необходимо учитывать надежность энергоснабжения, которая должна обеспечиваться за счет резерва генерирующих мощностей. Подход к решению задачи может быть осуществлен на основе работы [2].

Если принять, что: P_i – дефицит электроэнергии при возникновении I -го технологического нарушения (из m), то условие непринятия риска будет иметь вид:

$$r_n = \max P_i \quad (1)$$

где r_n – резерв мощности, выбранный исходя из непринятия риска.

На практике широкое распространение получило использование дисперсии в качестве показателя риска:

$$s_r^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (p_i - \bar{r})^2 \quad (2)$$

Риск, что возникший из-за технологического нарушения дефицит мощности P_i не будет покрыт имеющимся резервом $\bar{r}$ тем выше, чем больше величина дисперсии.

В электроэнергетике i -е технологическое нарушение является рискованным, если:

$$P_i \geq r^n, \quad (3)$$

то есть образовавшийся в результате данного нарушения дефицит превышает имеющийся резерв мощности.

Более удачной оценкой риска в такой постановке представляется верхняя оценка дефицита, возникшего при неблагоприятном стечении обстоятельств, то есть это дефицит мощности в наихудшем случае. Оценивая наихудший возможный вариант, выбирают некоторый уровень вероятности γ и оценивают величину дефицита, который может возникнуть с вероятностью γ .

Указанные подходы могут быть использованы для оценки оптимальности использования потоков энергии, т. е. для создания системы управления установки.

Представим моделирование системы энергоснабжения от возобновляемых источников энергии, разработанной авторами и описанной в работе [12].

Для моделирования многоуровневой системы энергоснабжения от возобновляемых источников энергии воспользуемся теорией графов [1, 3, 14], на основе которой может быть определен критический путь.

На рис. 1 приведен размеченный граф работы системы энергоснабжения от возобновляемых источников энергии.

На основе графа может быть построена матрица $n \times m$, где $n = 6$ – число вершин; $m = 10$ – число ребер.

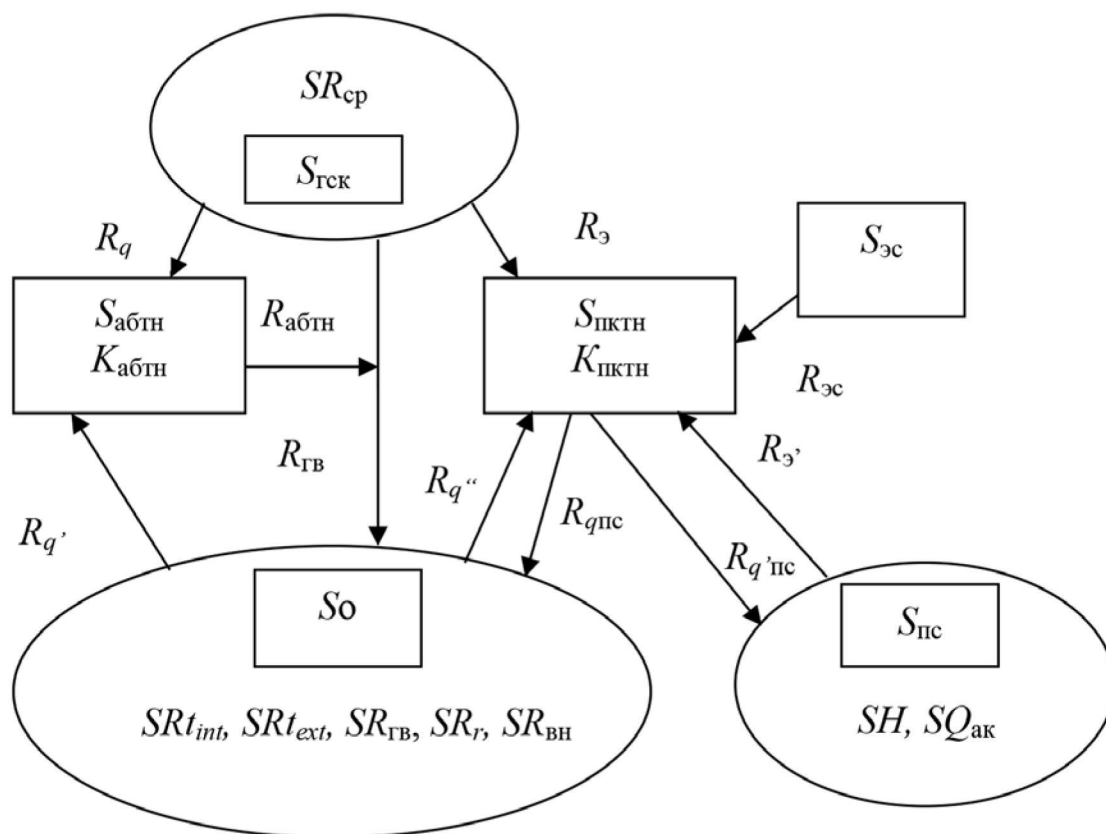


Рис. 1. Граф работы системы энергоснабжения от возобновляемых источников энергии:

S_o – потребитель энергии (обособленный объект); $S_{гск}$, $S_{пс}$, $S_{эс}$ – источники энергии, соответственно: гибридный солнечный коллектор, петротермальная скважина, электрическая система; $S_{абтн}$, $S_{пкпн}$ – трансформаторы тепла, соответственно: абсорбционный тепловой насос и парокомпрессорный тепловой насос; SR_{int} , SR_{ext} , $SR_{гв}$, SR_r , $SR_{вн}$, SR_p , SR_{qp} , $SR_{ш}$, SH , $SQ_{ак}$ – возмущающие воздействия, соответственно: температура помещения, температура наружного воздуха, нагрузка на систему горячего водоснабжения, термическое сопротивление ограждающих конструкций зданий, солнечная радиация, внутренние тепловыделения, глубина петротермальной скважины, теплоаккумулирующая способность петротермальной скважины; $K_{абтн}$, $K_{пкпн}$ – коэффициенты трансформации тепла, соответственно: абсорбционного теплового насоса и парокомпрессорного теплового насоса; R_q , $R_{q'}$, $R_{эс}$, $R_{эс'}$, $R_{qпс}$, $R_{qпс'}$, $R_{q''}$, $R_{эс}$, $R_{эс'}$, $R_{qпс}$, $R_{qпс'}$ – потоки тепловой энергии; $R_э$, $R_{эс}$ – потоки электрической энергии и энергии от гибридного солнечного коллектора внешней сети.

Оценочные расчеты мощности гибридного солнечного коллектора и мощностей потребителей энергии, выполненные в работах [9, 10, 11, 12, 13], определяют критические пути графа для двух периодов – теплого и холодного. Соответственно, матрица графа разделена на две по периодам года (теплый – таблица 1, холодный – таблица 2), где t_{ext} , t_{max} , $t_{5, 0,92}$, 8°C – соответственно: расчетная температура наружного воздуха для заданного периода; среднемесячная температура наиболее жаркого месяца; средняя температура наиболее холодной пятидневки с коэффициентом обеспеченности 0,92; температура переходного периода.

Таблица 1

Матрица графа для теплого периода ($8^{\circ}\text{C} < t_{ext} < t_{max}$)

	R_q	$R_{q'}$	R_{ze}	R_j	$R_{q''}$	R_{qnc}	$R_{q'nc}$	$R_{j'}$	$R_{эс}$	$R_{абтн}$
$S_{гск}$	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
$S_{абтн}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
S_o	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
$S_{пкtn}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$S_{пс}$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
$S_{эс}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Таблица 2

Матрица графа для холодного периода ($t_{5; 0,92} < t_{ext} < 8^{\circ}\text{C}$)

	R_q	$R_{q'}$	R_{ze}	R_j	$R_{q''}$	R_{qnc}	$R_{q'nc}$	$R_{j'}$	$R_{эс}$	$R_{абтн}$
$S_{гск}$	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
$S_{абтн}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S_o	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$S_{пкtn}$	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
$S_{пс}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$S_{эс}$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Вероятность использования резервного источника теплоснабжения ($S_{эс}$) определится по формуле

$$p_{\tau} = (1 - n_{\tau} / 24 + \xi_{\tau}), \quad (4)$$

где n – число часов светлого времени суток периода τ ; ξ – коэффициент ясности атмосферы.

Целевая функция (мощность резервного источника электроэнергии для покрытия «пиковых» нагрузок) определяется на основе теплового баланса схемы для расчетного периода:

$$QS_{эс} = QS_o - kQS_{гск}; \quad (5)$$

$$\frac{dR_{эс}}{d\tau} = \frac{QS_{эс}}{\kappa_{пкtn} p_{\tau}}, \quad (6)$$

где QS_o , $QS_{гск}$, $QS_{эс}$ – суммарные тепловые потоки здания, гибридного солнечного коллектора и расход электроэнергии электрической системы; k – коэффициент трансформации тепла тепловыми насосами.

Величины SR_{int} и SR_r можно считать постоянными величинами, а величины SR_{ze} , $SR_{вн}$ – как усредненные показатели.

Переменные величины будут определяться системой дифференциальных уравнений согласно графу на основе известных зависимостей [4, 5, 7, 8].

Теплый период (7):

$$\frac{dQS_{гск}}{d\tau} = RE;$$

$$\frac{dQS_o}{dt} = R_{нар} + R_{вн};$$

$$R_{гв} = \frac{2}{3} \frac{dQS_{гск}}{d\tau} + k_{абтн} \frac{dQS_{абтн}}{d\tau};$$

$$\frac{dR_q}{d\tau} = \frac{2}{3} \frac{dQS_{\text{гск}}}{d\tau} - R_{\text{гв}};$$

$$\frac{dR_{\text{г}}}{d\tau} = \frac{1}{3} \frac{dQS_{\text{гск}}}{d\tau},$$

$$\frac{dR_{q'}}{d\tau} = \frac{dR_q}{d\tau} k_{\text{абтн}};$$

$$\frac{dR_{q''}}{d\tau} = \frac{dR_{\text{г}}}{d\tau} k_{\text{пкпн}};$$

$$\frac{dR_{q' \text{ пс}}}{d\tau} = \frac{dR_{q''}}{d\tau}.$$

Холодный период (8):

$$\frac{dQS_{\text{гск}}}{d\tau} = RE;$$

$$\frac{dQS_0}{dt} = R_{\text{нар}}^3 - R_{\text{вн}};$$

$$R_{\text{гв}} = \frac{2}{3} \frac{dQS_{\text{гск}}}{d\tau};$$

$$\frac{dR_{\text{г}}}{d\tau} = \frac{1}{3} \frac{dQS_{\text{гск}}}{d\tau},$$

$$\frac{dR_{q \text{ пс}}}{d\tau} = \frac{dR_{\text{г}}}{d\tau} k_{\text{пкпн}};$$

$$\frac{dR_{q'}}{d\tau} = \frac{dR_{q \text{ пс}}}{d\tau},$$

где $R_{\text{нар}}$, $R_{\text{нар}}^3$ – соответственно: тепlopоступления в помещение через наружные ограждения в летний период и тепlopотери через наружные ограждения в зимний период; R – отношение среднемесячных дневных количеств солнечной радиации, поступающих на наклонную и горизонтальную поверхности; E – среднемесячное дневное количество суммарного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, МДж/(м² день).

Таким образом, разработанная на основе теории графов математическая модель работы системы энергоснабжения от возобновляемых источников энергии позволит определить требуемую мощность резервного источника электроэнергии для покрытия «пиковых» нагрузок, а также использовать ее в системе автоматического управления разработанным энергетическим комплексом.

Литература

1. Блинов Ю. Ф., Иванцов В. В., Сербя П. В. Методы математического моделирования. Ч. 1 [Электронное учебное пособие]. Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. 42 с.
2. Будовский В. П. Методология оценки риска диспетчерского управления в условиях дефицита мощности энергосистемы: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Ставрополь, 2011.
3. Дистель Р. Теория графов / пер. с англ. Новосибирск: Изд-во Института математики, 2002. 336 с.
4. Инженерные сети, оборудование зданий и сооружений: учебник / Е. Н. Бухаркин, В. М. Овсянников, К. С. Орлов и др.; под ред. Ю. П. Соснина. М.: Высшая школа, 2001. 415 с.
5. Мохаммед Камил Али Гази. Энергоустановка для теплоснабжения потребителей с использованием солнечных нагревателей в климатических условиях Ирака: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2015.

6. Сидельников В. И. Методология построения и анализа математических моделей систем теплоснабжения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск, 2004.
7. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / В. А. Ананьев, Л. Н. Балусева, А. Д. Гальперин и др.: учеб. пособие. М.: Евроклимат; Арина, 2000. 416 с.
8. Справочник проектировщика. Часть I. Отопление / под ред. И. Г. Старовойтова. М.: Стройиздат, 1991.
9. Стоянов Н. И. Проблемы и перспективы использования возобновляемых источников энергии / Н. И. Стоянов, А. И. Воронин, С. В. Буслов, А. Г. Стоянов, А. В. Шагров // Современная наука и инновации. 2015. № 2 (10). С. 114–122.
10. Стоянов Н. И. Комплексное энергоснабжение обособленных объектов от солнечной энергии / Н. И. Стоянов, А. И. Воронин, А. Г. Стоянов, А. В. Шагров. Ставрополь: СКФУ, 2014. 96 с.
11. Стоянов Н. И. Оценка потенциала комплексного энергоснабжения обособленных объектов от солнечного коллектора / Н. И. Стоянов, А. И. Воронин, А. Г. Стоянов, А. В. Шагров // Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал / Научно-технический центр «ТАТА». 2014. № 13 (153). С. 12–16.
12. Стоянов Н. И. Повышение эффективности энергоснабжения от гибридного солнечного коллектора / Н. И. Стоянов, А. И. Воронин, А. Г. Стоянов, А. В. Шагров // Альтернативная энергетика и экология: международный научный журнал / Научно-технический центр «ТАТА». 2015. № 5 (169). С. 14–18.
13. Стоянов Н. И., Стоянов А. Г. Абсорбционные тепловые насосы в системах комплексного энергосбережения обособленных объектов от возобновляемых источников энергии // Наука. Инновации. Технологии: научный журнал СКФУ. 2013. № 4. С. 51–64.
14. Черденникова А. В., Землякова И. В. Введение в теорию графов. Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2011. 24 с.
15. Шишкин Н. Д. Комбинированное и эффективное использование источников тепловой энергии в автономных теплоэнергетических комплексах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Астрахань, 2004.