

---

---

УДК 620.98

## ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ У АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ АГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© 2024 г. Е. А. Барахтенко<sup>1</sup>, Г. С. Майоров<sup>1, \*</sup>, Д. В. Соколов<sup>1</sup>, В. Б. Ташлыкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

\*e-mail: mayorovgs@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 29.10.2024 г.

После доработки 08.11.2024 г.

Принята к публикации 12.11.2024 г.

В последние годы в энергетике широкое развитие получило направление, связанное с внедрением распределенной генерации энергии и появлением активных потребителей (АП), в том числе в рамках системы теплоснабжения. Ввиду появления у потребителей роли участников энергетических рынков, принимающих активное участие в процессе управления своим энергоснабжением, возникает необходимость принимать решения о вариантах энергоснабжения в условиях несовпадающих интересов сторон – АП и системы централизованного теплоснабжения (СЦТ). В статье выполнена математическая постановка задачи поиска компромиссного решения, которая включает в себя модель АП, модель СЦТ и обобщенный критерий желательности. Разработана методика выбора оборудования источников энергии у АП в СЦТ с учетом интересов СЦТ и АП и их возможности производства тепловой энергии. Предложена структура мультиагентной системы и разработаны алгоритмы поведения агентов, учитывающие сложный характер поведения АП и объектов СЦТ. Приведены результаты апробации разработанного методического и программного обеспечения на тестовой модели системы теплоснабжения.

*Ключевые слова:* централизованная система теплоснабжения, активные потребители, мультиагентный подход, мультиагентная система, источник тепловой энергии, распределенная генерация

DOI: 10.31857/S0002331024050045

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение условий функционирования существующей энергетической инфраструктуры ставит множество задач, связанных с развитием и преобразованием систем энергоснабжения [1], включая системы теплоснабжения [2]. Усложняется

поведение участников процесса энергоснабжения за счет использования источников распределенной генерации энергии и регулирования своих графиков нагрузки, увеличивается количество связей и объемы передаваемой информации между ними. Проектируемые энергосистемы должны быть ориентированы на повышение показателей эффективности производства энергии, управляемости и эффективности функционирования энергосистем [3], снижение потерь энергии при транспортировке, повышение доли используемых в энергосистеме возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [4]; данные задачи сложно реализовать без значительных капиталовложений – применение ВИЭ большой мощности влечет за собой необходимость маневренного источника, который будет сглаживать неравномерность его выработки, что в свою очередь увеличивает объем необходимых инвестиций.

В последнее время растет число активных потребителей (АП) с собственными источниками энергии, в том числе крупные потребители с ВИЭ [5]. АП способны сами определять объем энергии вырабатываемый на собственных источниках и объем энергии, потребляемый от централизованного теплоснабжения, что обеспечивает достижение необходимого уровня качества энергопотребления [6]. Роль АП в области производства и использования энергии становится все более значительной, и эту тенденцию необходимо учитывать в контексте устойчивого развития энергетических систем [7]. Естественно, что возможности по выработке тепловой энергии АП и системы централизованного теплоснабжения (СЦТ) не согласованы, и при больших излишках собственной выработки АП будет стремиться поставить как можно больше тепловой энергии в СЦТ. При этом не учитываются потребности в тепловой энергии других потребителей, затраты на электроэнергию, необходимую для передачи тепла по сети, а также влияние на тарифы на тепловую энергию. Аналогично и СЦТ стремится поставлять максимально возможное количество тепловой энергии, несмотря на возможности АП по распределению своего спроса во времени на энергию и использования собственной генерации, чтобы увеличить свой доход от отпускаемой энергии. Следовательно, необходимо регулировать функционирование энергосистемы в условиях роста распределенной генерации и доли АП с помощью определения таких значений поставок тепловой энергии, при которых будет достигаться компромисс между величиной затрат на энергоснабжение АП и затратами СЦТ. Однако организация эффективного взаимодействия между АП и СЦТ пока не достигнута и требует разработки новых научных подходов. Для решения задач согласования работы распределенных источников, АП и СЦТ в ряде исследований [8–10] предлагаются методические подходы на основе агентных технологий. Эти технологии позволяют представлять объекты в энергетической системе в виде агента со своими техническими особенностями и индивидуальным поведением [11–12].

В настоящей статье предлагается новая методика выбора оборудования источников энергии у АП в СЦТ. Разработана математическая модель получения компромисса, которая включает в себя модель АП, модель СЦТ и обобщенный критерий желательности. Разработана мультиагентная модель системы теплоснабжения в программной среде AnyLogic, которая через специальные программные компоненты взаимодействует с системой MATLAB и осуществляет определение оптимального набора оборудования источников у АП на основе предложенной методики. Получаемое в результате решение учитывает интересы СЦТ и АП и их возможности производства тепловой энергии. С использованием разработанного методического и программного обеспечения выполнен эксперимент на тестовой схеме системы теплоснабжения и найден оптимальный состав оборудования источников энергии у АП.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОМПРОМИССНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОСТАВОК ТЕПЛОВОЙ  
ЭНЕРГИИ МЕЖДУ АКТИВНЫМ ПОТРЕБИТЕЛЕМ И СИСТЕМОЙ  
ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Постановка задачи определения компромиссного значения поставок тепловой энергии между АП и СЦТ подразумевает множество объектов с противоположными целями, т.е. многокритериальную задачу. С целью упрощения можно описать каждый объект с помощью функции желательности Харрингтона – это позволяет учитывать все зависимости между объектами, принимать во внимание конфликт интересов и рассматривать все объекты равноправными. Функции желательности используются при решении различных задач, таких как выбор агротехнического оборудования [13], оценка научно-технического потенциала оборонно-промышленного комплекса [14] и оценка состояния окружающей среды промышленных зон городов [15].

Для описания объекта с помощью функции желательности Харрингтона (табл. 1), необходимо определить допустимый диапазон значений и характеристик объекта. Минимальное и максимальное значения этого диапазона обозначены как реперные точки. Так как низкий уровень качества при описании функции суммарных затрат на теплоснабжение ведет к несоблюдению энергетического баланса, то возможен только минимально допустимый уровень качества. Объекты АП и СЦТ имеют некоторый уровень, ниже которого затраты упасть не могут, следовательно, могут быть описаны функциями желательности для одностороннего ограничения, имеющими следующий вид [14]:

$$d_{АП} = \exp(-\exp(b_0^{АП} + b_1^{АП} \cdot y_{АП})), \quad (1)$$

$$d_{СЦТ} = \exp(-\exp(b_0^{СЦТ} + b_1^{СЦТ} \cdot y_{СЦТ})), \quad (2)$$

где  $b_0^{АП}$ ,  $b_1^{АП}$  – коэффициенты уравнения желательности значений затрат на теплоснабжение АП;  $y_{АП}$  – значение затрат на теплоснабжение АП;  $b_0^{СЦТ}$ ,  $b_1^{СЦТ}$  – коэффициенты уравнения желательности значений затрат СЦТ;  $y_{СЦТ}$  – значение затрат СЦТ.

С помощью нелинейных уравнений, описывающих функцию желательности для рассматриваемых целевых функций в реперных точках ( $d = 1$  и  $d = 0.37$ ) можно определить коэффициенты  $b_0^{АП}$ ,  $b_1^{АП}$ ,  $b_0^{СЦТ}$  и  $b_1^{СЦТ}$ .

**Таблица 1.** Шкала желательности Харрингтона

Значение функции желательности	Характеристика объекта
1.00	Лучший уровень
0.80	Хороший уровень
0.63	Средний уровень
0.37	Минимально допустимый уровень
0.20	Низкий уровень
0.00	Совершенно неприемлемое состояние

Уравнения для определения частных функций желательности Харрингтона затрат на теплоснабжение АП:

$$\begin{cases} \exp(-\exp(b_0^{АП} + b_1^{АП} \cdot y_{АП})) = d_1^{АП} \\ \exp(-\exp(b_0^{АП} + b_1^{АП} \cdot y_{АП})) = d_2^{АП}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $d_1^{АП}$ ,  $d_2^{АП}$  – оценка желательности Харрингтона для затрат на теплоснабжение АП в реперных точках.

Уравнения для определения частных функций желательности Харрингтона затрат СЦТ:

$$\begin{cases} \exp(-\exp(b_0^{СЦТ} + b_1^{СЦТ} \cdot y_{СЦТ})) = d_1^{СЦТ} \\ \exp(-\exp(b_0^{СЦТ} + b_1^{СЦТ} \cdot y_{СЦТ})) = d_2^{СЦТ}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $d_1^{СЦТ}$ ,  $d_2^{СЦТ}$  – оценка желательности Харрингтона для СЦТ в реперных точках.

Свертка частных критериев желательности происходит согласно выражению:

$$S(y_{АП}, y_{СЦТ}) = \left( \sum_{n=1}^N d_{АП}^n + d_{СЦТ} \right) / (N + 1), \quad (5)$$

где  $S$  – обобщенный критерий желательности Харрингтона;  $n$  – порядковый номер системы теплоснабжения АП;  $N$  – количество рассматриваемых АП.

Функция цели модели определения компромисса имеет следующие составляющие:

$$\begin{cases} y_{АП}^n(Q_1^n, Q_2^n) = K_n \cdot E + (Z_{монл}(Q_1^n, Q_2^n) + Z_{нок.м/э}(Q_1^n) + Z_{аморт} - Z_{СЦТ}(Q_2^n)), \\ y_{СЦТ}(Q_1, Q_2) = Z_{монл}(Q_1) + Z_{э}(x_{i,\tau}, h_i) + Z_{зарп} + Z_{аморт} + Z_{нок.м/э}(Q_2), \\ S(y_{АП}, y_{СЦТ}) = \left( \exp(-\exp(b_0^{СЦТ} + b_1^{СЦТ} \cdot y_{СЦТ})) + \sum_{n=1}^N \exp(-\exp(b_{0,n}^{АП} + b_{1,n}^{АП} \cdot y_{АП}^n)) \right) / (N + 1), \end{cases} \quad (6)$$

где  $y_{АП}^n$  – затраты на теплоснабжение  $n$ -го АП;  $Q_1^n$  – количество тепловой энергии, поставляемой из СЦТ в систему теплоснабжения  $n$ -го АП, (кВт·ч);  $Q_2^n$  – количество тепловой энергии, поставляемой из системы теплоснабжения  $n$ -го АП в СЦТ, (кВт·ч);  $K_n$  – капиталовложения в систему теплоснабжения  $n$ -го АП, (руб.);  $E$  – коэффициент дисконтирования;  $Q_1 = (Q_1^1, \dots, Q_1^N)$  – вектор поставок тепловой энергии

из СЦТ к  $N$  системам теплоснабжения АП;  $Q_2 = (Q_2^1, \dots, Q_2^N)$  – вектор поставок тепловой энергии от  $N$  систем теплоснабжения АП в СЦТ;  $Z_{\text{топл}}$  – топливные затраты, (руб.);  $Z_{\text{нок.м/э}}(Q_1^n)$  – плата за поставленную из СЦТ тепловую энергию, (руб.);  $x_{\tau,i} = (x_{1,\tau}, \dots, x_{\tau,m})^T$  – вектор расходов на участках сети, (т/ч);  $h_{\tau} = (h_{\tau,1}, \dots, h_{\tau,m})^T$  – вектор потерь напора на ветвях в момент времени  $\tau$ , (м. вод. ст.);  $Z_{\text{аморт}}$  – амортизационные отчисления, (руб.);  $Z_{\text{СЦТ}}(Q_2^n)$  – плата за поставленную в СЦТ тепловую энергию, (руб.);  $Z_{\text{э}}$  – затраты на транспортировку теплоносителя, (руб.);  $Z_{\text{нок.м/э}}(Q_2)$  – плата за тепловую энергию, поставляемую из систем теплоснабжения  $N$ -количества АП в СЦТ, (руб.);  $y_{\text{АП}} = (y_{\text{АП}}^1, \dots, y_{\text{АП}}^N)$  – вектор затрат на теплоснабжение АП;  $y_{\text{СЦТ}}$  – значение затрат СЦТ, (руб.);  $b_{0,n}^{\text{АП}}, b_{1,n}^{\text{АП}}$  – коэффициенты частной функции желательности Харрингтона описывающего затраты на теплоснабжение  $n$ -го АП;  $b_0^{\text{СЦТ}}, b_1^{\text{СЦТ}}$  – коэффициенты частной функции желательности Харрингтона описывающего затраты СЦТ.

Обобщенный критерий оптимизации модели определения компромисса:

$$S(y_{\text{АП}}, y_{\text{СЦТ}}) = \frac{d_{\text{СЦТ}}(y_{\text{СЦТ}}) + \sum_{n=1}^N d_{\text{АП}}^n(y_{\text{АП}}^n)}{N + 1} \rightarrow \max, \quad (7)$$

где  $d_{\text{СЦТ}}$  – частная функция желательности, описывающая затраты СЦТ;  $d_{\text{АП}}^n$  – частная функция желательности, описывающая затраты на теплоснабжение  $n$ -го АП.

Уравнения энергетического баланса:

$$W_{\text{АП}}^n + Q_1^n - Q_2^n = D_{\text{АП}}^n, \quad n \in \{1, \dots, N\}, \quad (8)$$

$$W_{\text{СЦТ}} - \sum_{i=1}^I \sigma_i = D_{\text{ОП}} + \sum_{n=1}^N Q_1^n - \sum_{n=1}^N Q_2^n, \quad i \in \{1, \dots, I\}, \quad (9)$$

где  $W_{\text{АП}}^n$  – тепловая энергия, выработанная собственными источниками  $n$ -го АП, (кВт·ч);  $D_{\text{АП}}^n$  – величина спроса на тепловую энергию  $n$ -го АП, (кВт·ч);  $W_{\text{СЦТ}}$  – количество тепловой энергии, выработанное на централизованном источнике, (кВт·ч);  $\sigma_i$  – потери тепловой энергии на участках тепловой сети, (кВт·ч);  $I$  – количество участков тепловой сети;  $D_{\text{ОП}}$  – величина спроса на тепловую энергию обычных потребителей (ОП), (кВт·ч).

$$W_{\text{АП}}^n = \sum_{k=1}^K \alpha_k \cdot q_{k,\tau}, \quad \tau \in \{1, \dots, T\}, \quad (10)$$

где  $k$  – порядковый номер выбранной установки АП;  $K$  – количество выбранных установок собственной генерации  $n$ -го АП;  $\alpha_k$  – коэффициент выбора  $k$ -ой установки;  $q_{k,\tau}$  – выработка  $k$ -ой установки в период  $\tau$ ;  $T$  – конечный момент времени.

Ограничения:

$$y_{\text{СЦТ}}(Q_1, Q_2) \sim B, \quad (11)$$

$$B^{\min} \leq B \leq B^{\max}, \quad (12)$$

где  $B$  – расход топлива на источнике СЦТ;  $B^{\min}$  и  $B^{\max}$  – минимальный и максимальный расход топлива на источнике СЦТ.

Уравнения потокораспределения в системе теплоснабжения [16]:

$$Ax_\tau = q_\tau, \quad (13)$$

$$q_\tau = Q_1 - Q_2, \quad (14)$$

$$\bar{A}^T \bar{P}_\tau + H_\tau = h_\tau, \quad (15)$$

$$h_\tau = SX_\tau x_{\tau,i}, \quad (16)$$

где  $A$  ( $(p-1) \times m$ ) – матрица соединений  $p-1$  линейно независимых узлов и  $m$  ветвей;  $x_{\tau,i} = (x_{1,\tau}, \dots, x_{\tau,m})^T$  – вектор расходов на участках сети, (т/ч);  $q_\tau = (q_{\tau,1}, \dots, q_{\tau,p-1})^T$  – вектор массовых расходов в узлах в момент времени  $\tau$ , (т/ч);  $\bar{A}$  – полная ( $p \times m$ ) матрица соединений;  $\bar{P}_\tau = (P_{1,\tau}, \dots, P_{\tau,p})^T$  – вектор пьезометрических напоров в узлах сети в момент времени  $\tau$ , (м. вод. ст.);  $h_\tau = (h_{\tau,1}, \dots, h_{\tau,m})^T$  – вектор потерь напора на ветвях в момент времени  $\tau$ , (м. вод. ст.);  $H_\tau = (H_{\tau,1}, \dots, H_{\tau,m})^T$  – вектор действующих напоров насосных станций в момент времени  $\tau$ , (м. вод. ст.);  $S$  и  $X_\tau$  – ( $m \times m$ ) – диагональные матрицы, составленные из коэффициентов гидравлического сопротивления ветвей  $s_i$ , ( $\text{мч}^2/\text{кг}^2$ ) и абсолютных значений расходов на них  $|x_{\tau,i}|$ ,  $i \in \{1, \dots, m\}$  (т/ч).

### МЕТОДИКА ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ У АКТИВНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В СИСТЕМЕ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Алгоритм методики выбора оборудования источников энергии у АП в СЦТ представлен на рис. 1 и включает в себя следующие шаги:

1. Формирование исходных данных: для каждого рассматриваемого периода необходимы данные о тарифах на энергоресурсы, параметрах собственных источников

АП, капиталовложениях, спросе на тепловую энергию АП и ОП, а также о разнице между текущим (в этом часу) значением спроса каждого АП и возможной выработкой его предполагаемого источника тепловой энергии.

2. Определение параметров реперных точек диапазона для всех АП. Определение затрат на теплоснабжение АП в ситуации, когда АП покрывает свой спрос на тепловую энергию из СЦТ полностью, и в ситуации, когда АП покрывает спрос за счет своего источника и поставляет максимально возможное количество тепловой энергии в СЦТ осуществляется с помощью модели системы теплоснабжения АП.

3. Определение параметров реперных точек диапазона для СЦТ. Определение затрат на теплоснабжение в ситуации, когда СЦТ обеспечивает спрос на тепловую

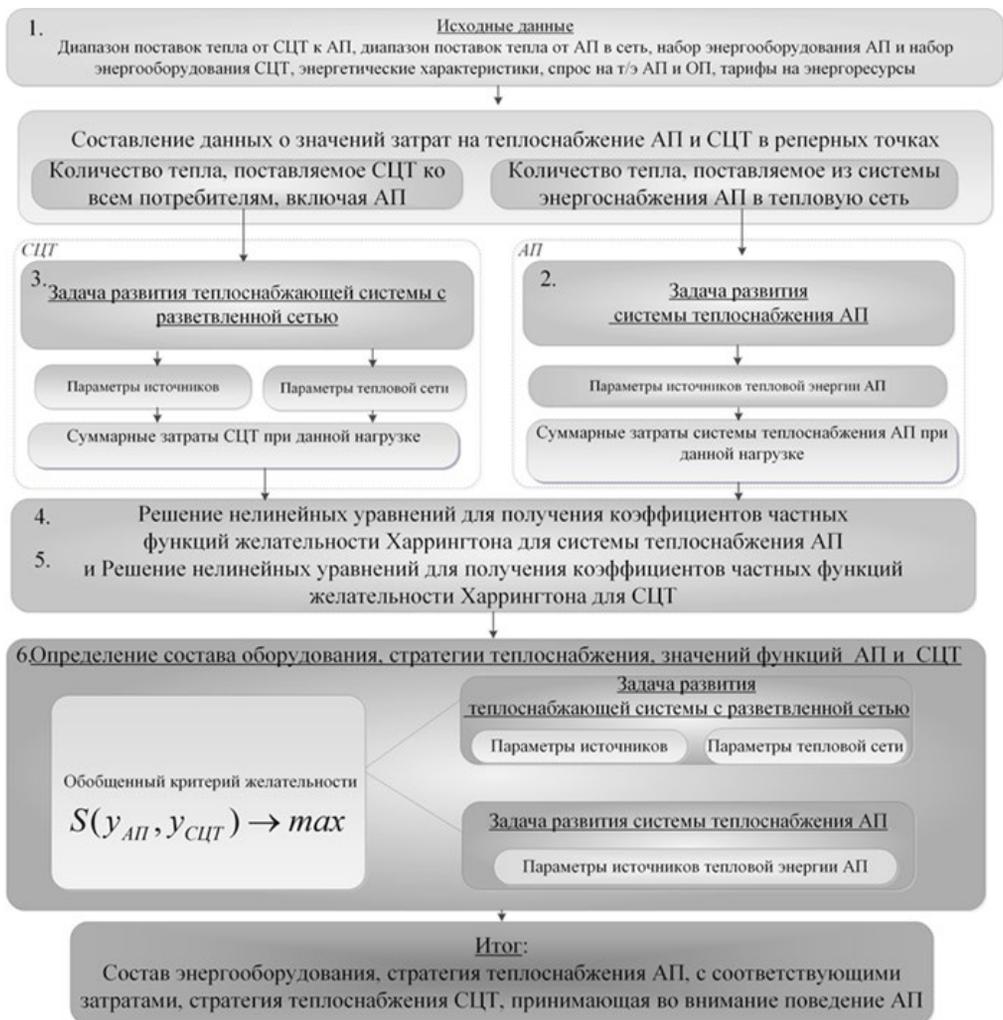


Рис. 1. Алгоритм методики выбора оборудования источников энергии у активных потребителей в системе централизованного теплоснабжения.

энергию всех АП и остальных потребителей, и в ситуации, когда СЦТ покрывает спрос только ОП, за исключением той части, которая покрывается за счет поставок от АП осуществляется с помощью модели СЦТ с разветвленной тепловой сетью.

4. Получение характеристик частных функций желательности Харрингтона для АП. Каждому значению затрат на теплоснабжение АП в реперных точках присваивается соответствующее значение на шкале желательности Харрингтона. Наиболее желательным в данном случае будет минимальное значение затрат на теплоснабжение АП, ему присваивается наибольшее значение. Получение коэффициентов уравнения, описывающего частную функцию желательности Харрингтона для затрат на теплоснабжение АП на всем диапазоне поставок тепловой энергии.

5. Получение характеристик частных функций желательности Харрингтона для СЦТ. Каждому значению затрат СЦТ в реперных точках присваивается соответствующее значение на шкале желательности Харрингтона. Наиболее желательным в данном случае будет минимальное значение затрат СЦТ, ему присваивается наибольшее значение. Получение коэффициентов уравнения, описывающего частную функцию желательности Харрингтона для затрат СЦТ на всем диапазоне поставок тепловой энергии.

6. Формирование модели определения компромиссного значения поставок тепловой энергии между СЦТ и АП. Она включает в себя модели рассматриваемых АП и модель СЦТ с разветвленной тепловой сетью. С помощью полученных в предыдущем шаге уравнений, связывающих затраты на теплоснабжение рассматриваемых объектов с оценкой на шкале желательности Харрингтона, осуществляется свертка частных критериев желательности в обобщенный критерий желательности Харрингтона, оптимизируемый в данной модели. Благодаря этому многокритериальную задачу определения компромиссного решения возможно свести к однокритериальной, с учетом всех заданных в моделях АП и СЦТ ограничений. В результате оптимизации определяется решение задачи определения компромиссного значения поставок тепловой энергии между АП и СЦТ, а также соответствующая стратегия теплоснабжения всех рассматриваемых потребителей.

## СТРУКТУРА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Для решения задач с использованием мультиагентного подхода разработана структура мультиагентной системы (МАС), в которой можно выделить два основных уровня взаимодействия агентов (рис. 2): СЦИ и АП. Каждый уровень представлен своим набором агентов, которые соответствуют энергетическим объектам данного уровня и отражают их поведение и характеристики. В СЦТ контроль и координацию объектов генерации, представленных агентами централизованных тепловых источников (АЦТИ), и распределения, представленных агентами тепловых магистралей (АТМ), тепловой энергии осуществляет агент системы централизованного теплоснабжения (АСЦТ), также через него осуществляется взаимодействие и обмен информацией с агентами АП (ААП). В свою очередь ААП содержат в себе трех агентов нижнего уровня, соответствующих трем типам источников тепловой энергии: агент тепловых насосов (АТН); агент электрических бойлеров (АЭБ); агент солнечных коллекторов (АСК). ААП осуществляют контроль над агентами нижнего уровня и выполняют обмен данными с АСЦТ. Соответственно агенты нижних уровней, представляющие энергетические объекты в СЦТ и у АП, осуществляют управление данными объектами и отстаивают их интересы в системе при

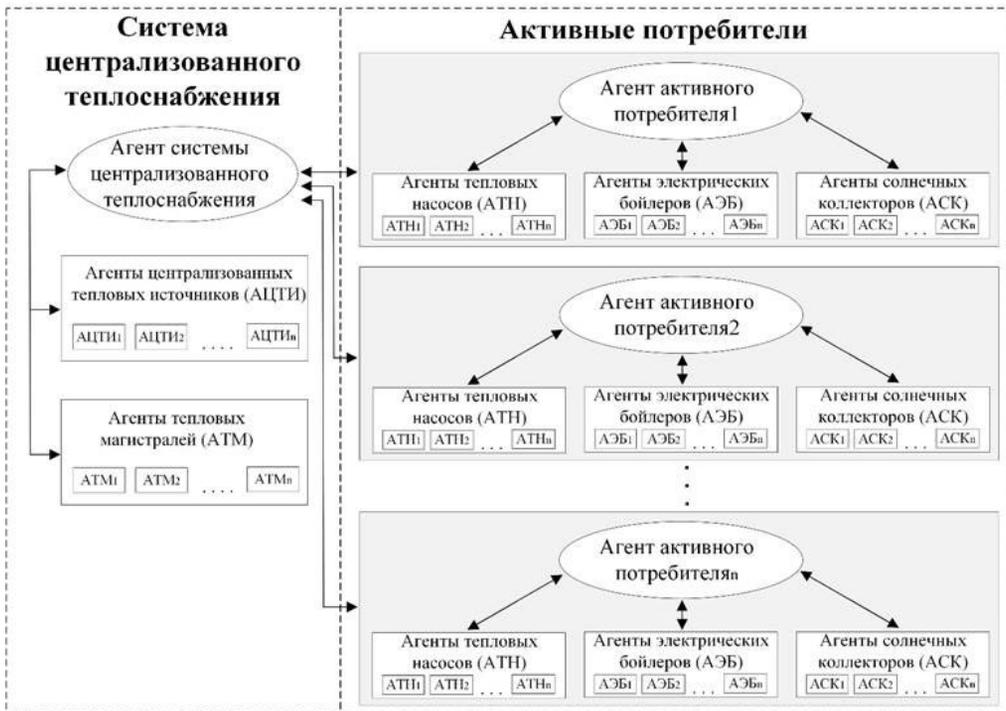


Рис. 2. Структура мультиагентной системы.

поиске компромиссного решения по определению состава оборудования и стратегии теплоснабжения.

Мультиагентная модель, основанная на представленной выше структуре МАС, разработана в программной среде AnyLogic [17–18], данная среда связана через специальные разработанные программные компоненты с системой MATLAB (рис. 3), в которой реализованы математические модели СЦТ и АП для расчета суммарных затрат и поиска компромиссного решения по определению состава энергоустановок СЦТ и АП, сетевого оборудования, стратегии теплоснабжения, значений функций АП и СЦТ. В разработанную мультиагентную модель загружаются необходимые данные для расчета соответственно для каждого агента: АЦТИ – данные по набору энергоустановок, их характеристики и цены на тепловую энергию; АТМ – данные по набору сетевого оборудования и их характеристики; АСЦТ – данные по диапазону поставок тепла от СЦТ к АП, спрос на тепловую энергию АП и ОП, тарифы на первичные энергоресурсы; АТН – данные по набору тепловых насосов, их характеристики и цены на тепловую энергию; АЭБ – данные по набору электрических бойлеров, их характеристики и цены на тепловую энергию; АСК – данные по набору солнечных коллекторов, их характеристики и цены на тепловую энергию; ААП – данные по диапазону поставок тепла от АП в сеть, спрос на тепловую энергию.

После загрузки всех данных запускается модель, и начинается процесс поиска решения. АСЦТ и ААП собирают соответствующие данные от своих агентов нижнего уровня по набору энергоустановок и их характеристик, а затем они обмениваются

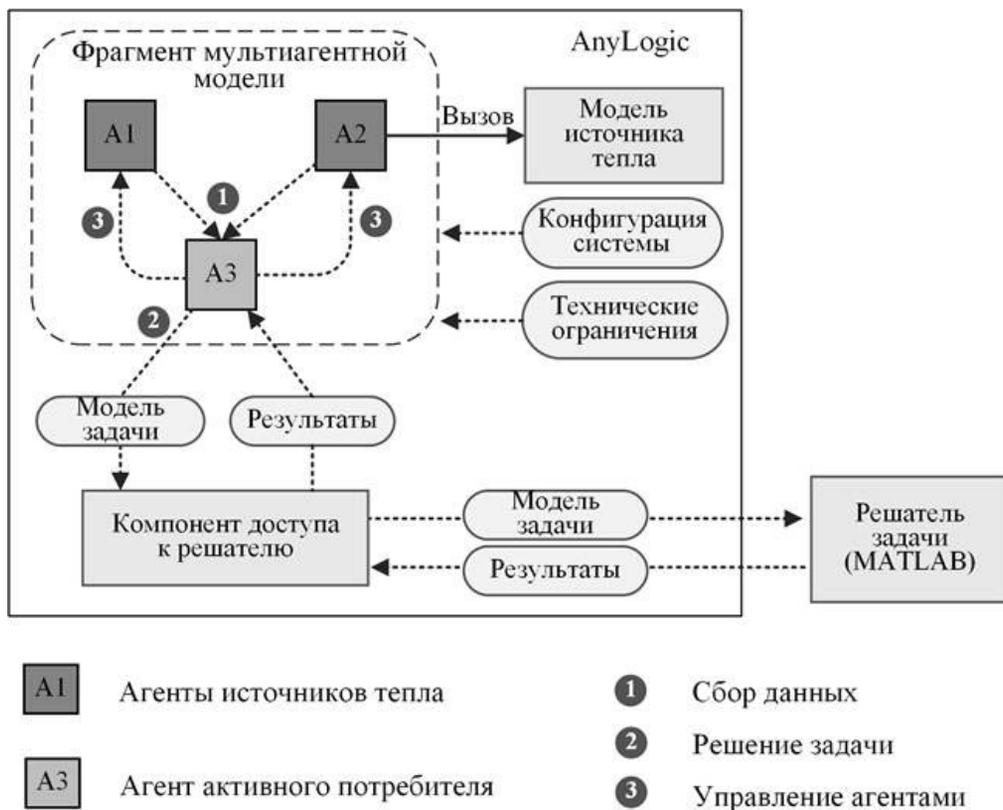


Рис. 3. Подключение системы MATLAB к программной среде AnyLogic.

между собой необходимыми для расчета данными по спросу и ценами на энергию. ААП сформировав пакет данных для расчета, отправляют их в систему MATLAB, где с помощью разработанных математических моделей и решателя смешанного целочисленного линейного программирования выполняется поиск решения для двух случаев:

- АП весь свой спрос потребляет из СЦТ, а сам в систему ничего не производит;
- АП весь свой спрос потребляет от своих источников и поставляет в сеть максимально возможное количество тепловой энергии.

Получив результаты решений, ААП отправляют все данные АСЦТ. В свою очередь АСЦТ на основании полученной информации от ААП формирует пакет данных и отправляет его в систему MATLAB, где с помощью разработанных математических моделей и нелинейного решателя выполняется поиск решения для двух случаев:

- СЦТ снабжает полностью спрос АП и ОП, АП ничего не поставляет в систему;
- СЦТ снабжает только ту часть спроса ОП, которую не удовлетворил АП.

Затем АСЦТ получает результаты расчета и на основании значений целевой функции СЦТ в двух точках формирует уравнение, описывающее желательность.

Аналогичное уравнение на основании значений целевой функции АП в двух точках формирует ААП. Полученные уравнения АСЦТ и ААП отправляют в систему MATLAB, где осуществляется поиск решения. В результате решения уравнений находятся коэффициенты уравнения для описания поведения СЦТ и АП. АСЦТ, получив необходимые коэффициенты из системы MATLAB, формирует данные для модели получения компромисса, которая включает в себя модель АП, модель СЦТ и обобщенный критерий желательности. Полученную систему нелинейных уравнений АСЦТ отправляет в систему MATLAB для поиска итогового решения по определению состава энергооборудования, стратегии теплоснабжения АП, с соответствующими затратами, и стратегии теплоснабжения СЦТ, принимающая во внимание поведение АП. Таким образом, полученное компромиссное решение АСЦТ отправляет своим агентам АЦТИ и АТМ, а также отправляет необходимую информацию ААП, которые рассылают их своим агентам нижнего уровня АТН, АЭБ и АСК. Агенты нижних уровней, получив данные по задействованному оборудованию, осуществляют управление своими источниками в соответствии с полученным решением.

### АПРОБАЦИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Для апробация разработанного методического и программного обеспечения авторами разработана тестовая схема системы теплоснабжения (рис. 4), которая включает централизованный источник тепла (котельную), 12 тепловых магистралей (ТМ), 4 ОП, 3 АП со своими источниками тепловой энергии: солнечный коллектор (СК); электрический бойлер (ЭБ); тепловой насос (ТН).

На тестовой схеме выполнялась оценка работоспособности разработанной методики и проводилось исследование взаимодействия АП в системе теплоснабжения при определении компромиссного значения поставок энергии между АП и СЦТ.

Исходные данные: тариф на уголь 4.6 руб./кг у.т.; тариф на тепловую энергию 1.355 руб./кВт·ч.; тариф на электроэнергию 3.43 руб./кВт·ч; температурный график был принят 110°/70°С. Для рассмотрения было принято, что к ТМ № 3 подключен АП № 1 (текстильный цех), к ТМ № 11 – АП № 2 (хлебобеккарный цех), и на ТМ № 6 располагается АП № 3, представляющий собой объединенного коммунально-бытового потребителя, как показано на рис. 4. Рассматриваемым горизонтом был принят год, график спроса на тепловую энергию всех потребителей в относительном виде представлен на рис. 5.

*Анализ полученных результатов.* По итогам обобщенный критерий желательности варьировался в диапазоне от 0.52 до 0.7, что представляет собой характеристику системы среднего уровня. Состав энергетического оборудования по итогам проведенной оптимизации: в системе теплоснабжения АП № 1 предлагается к установке тепловой насос, в системе теплоснабжения АП № 2 – тепловой насос, АП № 3 – электробойлер. При этом стратегия СЦТ предусматривает поставки от АП № 1 и АП № 2 преимущественно в весенний и осенний периоды, ввиду повышенной эффективности по сравнению с периодом минимальных температур, выбранных у этих потребителей установок – тепловых насосов. При снижении температуры наружного воздуха до проектной, происходит снижение выработки у АП № 1 и АП № 2 до полного перехода на источник СЦТ. Для АП № 3 наиболее подходящим вариантом оказался электробойлер, позволяющий обеспечивать тепловой энергией

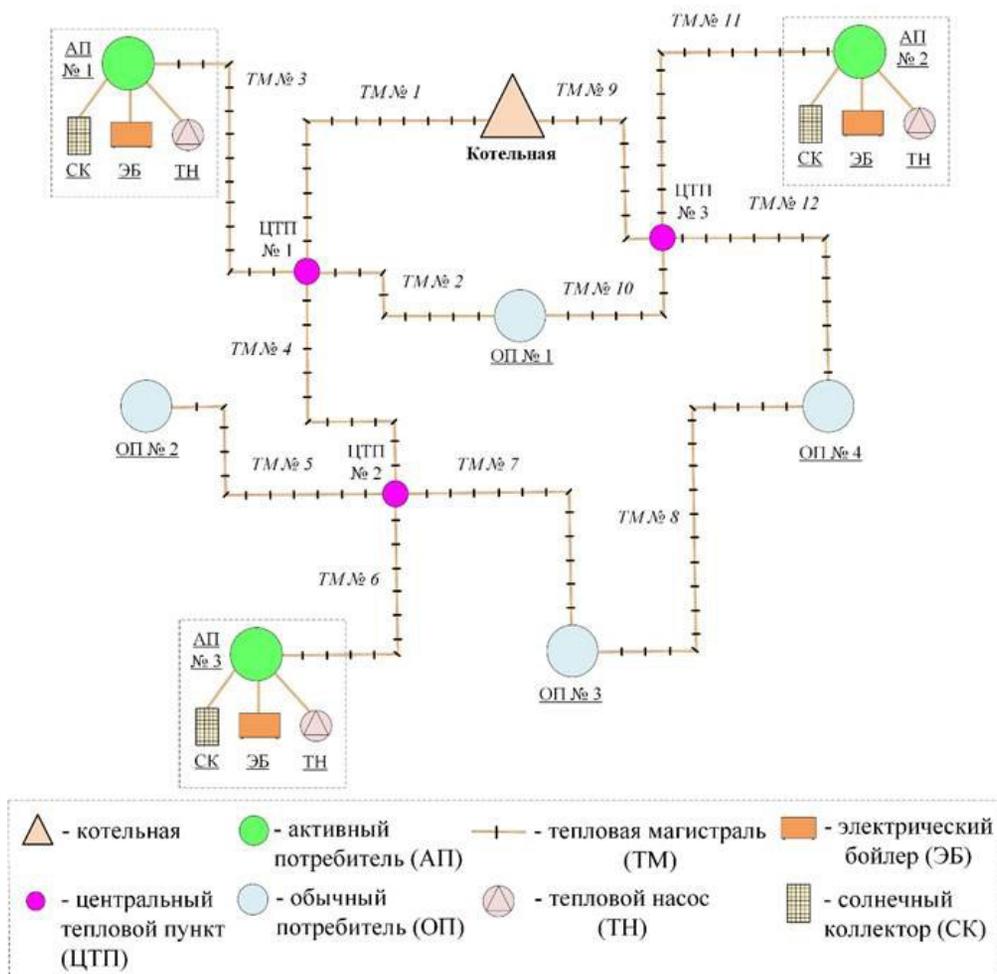


Рис. 4. Тестовая схема системы теплоснабжения.

и делать поставки тепловой энергии расположенным рядом потребителям. При этом стоит учитывать, что тариф на электроэнергию был принят постоянным в течение суток, в ином случае экономичность электробойлера для АП № 3 возрастет.

Полученные уравнения для частных критериев желательности систем теплоснабжения АП и СЦТ в зимний период:

$$d^{АП1} = \exp(-\exp(4.95 - 0.0122 \cdot y_{АП1}))$$

$$d^{АП2} = \exp(-\exp(5.61 - 0.0106 \cdot y_{АП2}))$$

$$d^{АП3} = \exp(-\exp(2.15 - 0.022 \cdot y_{АП3}))$$

$$d^{СЦТ} = \exp(-\exp(-0.41 - 0.0001 \cdot y_{СЦТ})).$$

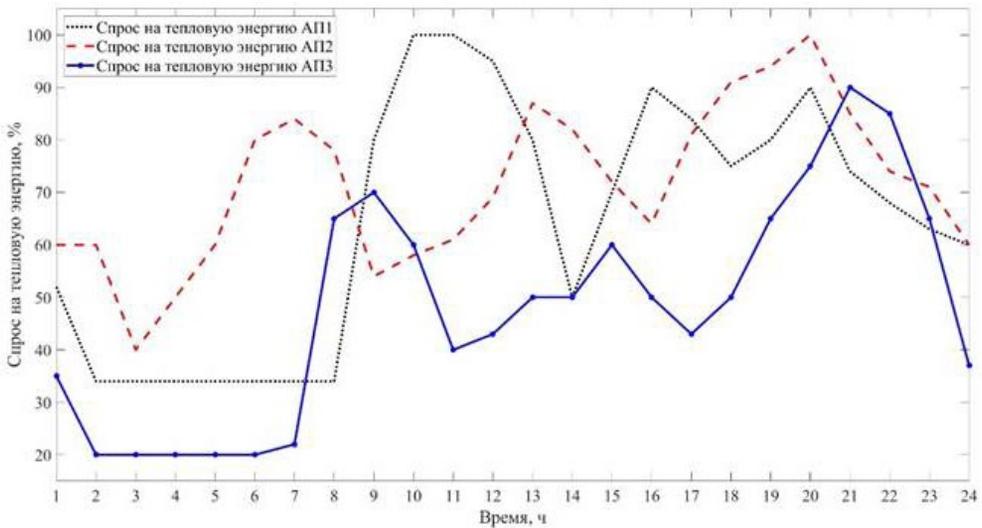


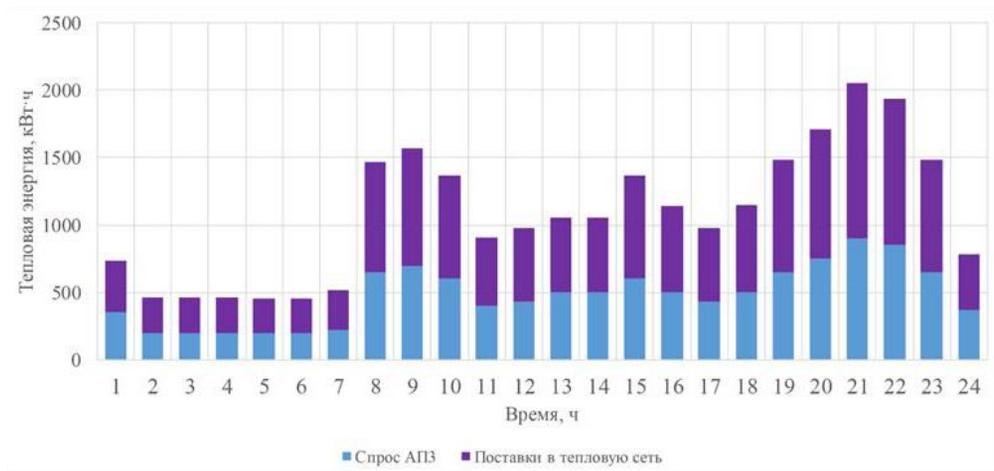
Рис. 5. Спрос на тепловую энергию всех потребителей.

В соответствии с приведенным ранее алгоритмом определения компромиссного значения поставок тепловой энергии между АП и СЦТ частные и обобщенный критерии желательности Харрингтона, полученные по итогам оптимизации в 1-м квартале, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Определение обобщенной желательности

	АП № 1	АП № 2	АП № 3	СЦТ
Затраты на теплоснабжение, руб.	413.4	541.8	704.3	25 154
Частная функция желательности	0.393	0.412	1	0.94
Обобщенный критерий	0.686			
Состав выбранного оборудования	Тепловой насос	Тепловой насос	Электробойлер	—

Ввиду того, что система теплоснабжения АП № 3 поставляет максимально доступное количество тепловой энергии в тепловую сеть, как показано на рис. 6, его частный критерий желательности максимален. Так как в этот период эффективность производства тепловой энергии в системах теплоснабжения АП № 1 и АП № 2 ниже, то они в этот период снабжают только собственный спрос на тепловую энергию. Частная функция желательности СЦТ несколько снижена, так как спрос всех АП покрывается из собственных источников. В третьем квартале ввиду низкой потребности в поставках тепловой энергии системы теплоснабжения АП вырабатывали тепловую энергию согласно спросу соответствующих АП. Выработка тепловой энергии в 1-м и 4-м кварталах аналогичны.

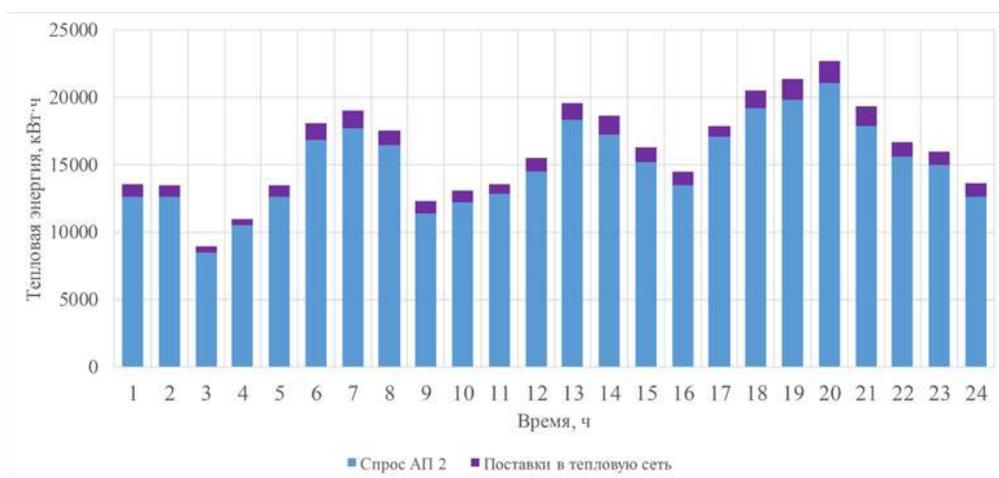


**Рис. 6.** Суточный график выработки тепловой энергии в системе теплоснабжения АП № 3 в 1-й квартал.

Во втором квартале система теплоснабжения АП № 2 также осуществляет поставки компромиссного количества тепловой энергии в СЦТ, как показано на рис. 7.

Результаты практического исследования выявили, какой состав оборудования источников у АП является оптимальным, а также объемы поставок энергии в системе теплоснабжения в условиях компромисса между АП и СЦТ.

Полученные результаты демонстрируют эффективность разработанного методического и программного обеспечения для определения оптимального набора оборудования источников у АП с учетом интересов СЦТ и АП и их возможностей производства тепловой энергии.



**Рис. 7.** Суточный график выработки тепловой энергии в системе теплоснабжения АП № 2 во 2-м квартале.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор оптимального состава оборудования источников тепловой энергии у АП является актуальной задачей, которая все острее стоит перед функционирующими в настоящее время системами теплоснабжения. Это связано с развитием технологий распределенной генерации и появлением АП, что приводит к необходимости разработки новых подходов для оптимального управления и развития объектов систем теплоснабжения. В рамках настоящей статьи выполнена математическая постановка задачи поиска компромиссного решения, которая включает в себя модель АП, модель СЦТ и обобщенный критерий желательности. Разработана методика выбора оборудования источников энергии у АП в СЦТ с учетом интересов СЦТ и АП и их возможности производства тепловой энергии. Предложенная методика реализована в мультиагентной системе. Эта система включает два уровня: СЦТ и АП, каждый из которых представлен своими агентами, отражающими поведение объектов этих уровней. Разработана мультиагентная модель тестовой схемы системы теплоснабжения, на основе которой выполнены вычислительные эксперименты. В результате проведенных расчетов найден оптимальный состав источников тепловой энергии у трех АП, определена стратегия теплоснабжения АП с соответствующими затратами, а также стратегия теплоснабжения СЦТ, принимающая во внимание поведение АП. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанное авторами методическое и программное обеспечение может быть использовано при моделировании теплоснабжающих систем нового поколения, имеющих в своем составе АП, и позволяет получить рекомендации по выбору типа и параметров источников тепла АП, работа которых согласована с функционированием централизованных источников тепла.

Исследование выполнено в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук при поддержке Российского научного фонда (грант № 24-29-00823).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенников В.А., Воронай Н.И., Барахтенко Е.А., Соколов Д.В. Цифровизация интегрированных энергетических систем // Энергобезопасность и энергосбережение, 2020. № 4. С. 5–10.
2. Стенников В.А., Постников И.В., Пеньковский А.В. Методы и модели оптимального управления теплоснабжающими системами с активными потребителями тепловой энергии // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2021. № 3. С. 12–23.
3. Воронай Н.И., Паламарчук С.И., Подковальников С.В. Современное состояние и проблемы электроэнергетики России // Проблемы прогнозирования, 2001. № 5. С. 49–69.
4. Воронай Н.И. Smart Grid: Мифы, реальность, перспективы // Энергетическая политика, 2010. № 2. С. 9–15.
5. Lee M., Han C., Kwon S., Kim Y. Energy and cost savings through heat trading between two massive prosumers using solar and ground energy systems connected to district heating networks // Energy, 2023. V. 284. 129347.
6. Pipiciello M., Caldera M., Cozzini M., Ancona M.A., Melino F., Pietra B.D. Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers // Energy, 2021. V. 223. 120036.

7. Filho W.L., Trevisan L.V., Lange Salvia A., Mazutti J., Dibbern T., Ruiz de Maya S., Bernal E.F., Eustachio J.H.P.P., Sharifi A., Alarcón-del-Amo M.D.C, Kushnir I. Prosumers and sustainable development: An international assessment in the field of renewable energy // *Sustainable Futures*, 2024. V. 7. 100158.
8. Stennikov V., Barakhtenko E., Mayorov G., Sokolov D., Zhou B. Coordinated management of centralized and distributed generation in an integrated energy system using a multi-agent approach // *Applied Energy*, 2022. V. 309. 118487.
9. Khan M.W., Wang J., Xiong L., Ma M. Modelling and optimal management of distributed microgrid using multiagent systems // *Sustainable Cities and Society*, 2018. V. 41. P. 154–169.
10. Kyriakou D.G., Kanellos F.D., Ipsakis D. Multi-agent-based real-time operation of microgrids employing plug-in electric vehicles and building prosumers // *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024. V. 37. 101229.
11. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. Прикладные многоагентные системы группового управления // *Искусственный интеллект и принятие решений*, 2009. № 2. С. 3–24.
12. Wooldridge M., Jennings N. Intelligent Agents: Theory and Practice // *The Knowledge Engineering Review*, 1995. V. 10. № 2. P. 115–152.
13. Захахатнов В.Г., Попов В.М., Афонькина В.А. Функция желательности Харрингтона как критерий оптимального выбора зерносушилки // *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*, 2022. № 2(94). С. 110–114.
14. Николаев А.Е. Методика оценки состояния научно-технологического потенциала оборонно-промышленного комплекса России с использованием функции желательности Харрингтона // *Экономический анализ: теория и практика*, 2013. № 30 (333). С. 22–33.
15. Беспалов В.И., Котлярова, Е.В. Основные принципы совершенствования методики социо-эколого-экономической оценки состояния окружающей среды территорий промышленных зон крупных городов // *Инженерный вестник Дона*, 2011. № 4. С. 137–144.
16. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей / М.: Наука, 1985. 278 с.
17. Antonova V., Grechishkina N., Kuznetsov N. Analysis of the Modeling Results for Passenger Traffic at an Underground Station Using AnyLogic // *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2020. V. 65. P. 712–715.
18. Zhang Y., Wang Y., Wu L. Research on Demand-driven Leagile Supply Chain Operation Model: a Simulation Based on AnyLogic in System Engineering // *Systems Engineering Procedia*, 2012. V. 3. P. 249–258.

## **Selection of Energy Sources for Prosumers in the Centralized Heat Supply System Using Agent Technologies**

**E. A. Barakhtenko<sup>a</sup>, G. S. Mayorov<sup>a, \*</sup>, D. V. Sokolov<sup>a</sup>, V. B. Tashlykova<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Irkutsk, Russia*

*\*e-mail: mayorovgs@isem.irk.ru*

In recent years, the energy sector has been widely developing the direction associated with the introduction of distributed energy generation and the emergence of prosumers (PR), including within the heat supply system. Due to the emergence of consumers as participants in energy markets who take an active part in the process of managing their energy supply, there is a need to make decisions on energy supply options in the context of conflicting interests of the parties - the PR and the centralized heat supply system (CHS). The article presents a mathematical formulation of the problem of finding a compromise solution, which includes an PR model, a CHS model and a generalized desirability criterion. A methodology for selecting energy source equipment for PR in the CHS has been developed, taking into account the interests of the CHS and PR and their ability to produce heat energy. A structure of a multi-agent system is proposed and agent behavior algorithms are developed that take into account the complex behavior of the PR and CHS objects. The results of testing the developed methodological and software on a test model of the heat supply system are presented.

*Keywords:* centralized heat supply system, prosumers, multi-agent approach, multi-agent system, heat energy source, distributed generation