

ОПТИМИЗАЦИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ФУНКЦИЙ АКТИВНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ

И.В. Постников

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия

Рассматривается проблема анализа и оптимизации надежности теплоснабжения активного потребителя (АП) тепловой энергии в теплоснабжающих системах (ТСС) с учетом их дополнительной тепловой мощности, обеспечиваемой собственными источниками тепловой энергии (ИТ). Сформулирована научно-методическая проблема, заключающаяся в определении оптимального соотношения значений параметров надежности элементов ТСС (интенсивностей отказов и/или восстановлений) и мощности собственного ИТ АП, обеспечивающего требуемый уровень надежности теплоснабжения при минимальных суммарных затратах на обеспечение элементной надежности системы и эксплуатацию собственных ИТ АП. Предложены методы решения сформулированной задачи, основанные на использовании теории надежности, моделей марковских случайных процессов, некоторых закономерностей теории вероятностей, узловых ПН, моделей теории гидравлических цепей и укрупненных закономерностей теплофизических процессов, протекающих при теплоснабжении потребителей. Проведен вычислительный эксперимент с использованием разработанных методов на основе тестовой схемы ТСС с характеристиками, приближенными к реальным системам, сформулированы выводы и направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: теплоснабжающая система, активный потребитель, анализ и оптимизация надежности, интегральный параметр надежности элементов, марковский случайный процесс, узловые показатели надежности, теория гидравлических цепей.

Введение

Актуальность. Общей тенденцией развития современных энергетических систем наряду с широкомасштабным внедрением новых энергоэффективных и экологически чистых технологий является их переход к новым принципам построения систем, основанным на интеграции различных энергетических технологий с интеллектуальным управлением технологическими и экономическими процессами [1–3]. Так, Н. Lund с соавторами в статье [1] приводят достаточно обширный обзор исследований в области интеллектуальных интегрированных энергетических систем, рассматриваются основные положения, свойства и преимущества перехода к таким системам. Работа [2] того же авторского коллектива посвящена концептуальным вопросам взаимосвязанного развития интеллектуальных энергетических систем и так называемых систем теплоснабжения 4-го поколения (4GDH systems). В статье [3] рассмотрены некоторые методические аспекты исследования мультиэнергетических систем, объединяющих различные энергетические технологии, предлагаются агрегированные модели их управления на основе множественных критериев оценки.

В рамках описанной парадигмы развития энергетики одним из перспективных направлений является формирование так называемых централизованно-распределенных энергосистем, которые оптимально сочетают в себе преимущества цен-

трализованного и автономного (индивидуального) энергоснабжения. Одним из базовых элементов таких систем являются активные потребители (АП, англ. – prosumer), которые оптимально регулируют свой график потребления с помощью собственного источника энергии и/или накопителей энергии, уменьшая нагрузку на централизованные источники и сеть. Целесообразность внедрения технологий АП имеет два основных аспекта. Первый связан с повышением эффективности и экономичности функционирования энергосистемы за счет оптимального распределения загрузки между централизованными и распределенными источниками (например, за счет экономии топлива централизованными источниками за счет перевода пиковой нагрузки на АП). Второй аспект заключается в обеспечении у АП дополнительного резерва мощности и времени, что позволяет сократить нагрузку на централизованные источники и сети, тем самым повышая надежность функционирования энергосистемы в целом.

Обзор исследований. В настоящее время исследования по реализации концепции АП ведутся в основном для электроэнергетических систем (ЭЭС). Например, в работе [4] авторами представлены методы многоцелевой оптимизации для выбора состава оборудования и управления такой системой с участием АП, рассмотрена взаимосвязь между эксплуатационными и инвестиционными затратами, роль резервов в снижении эксплуата-

ционных затрат. Авторы статьи [5] предлагают рыночную модель планирования режимов энергосистемы с учетом функционирования АП и свойств их гибкости. Н. Yang и соавторы [6] разработали модель оптимального оперативного управления режимами локальных мультиэнергетических АП, функционирующих в составе ЭЭС, с учетом реакции спроса на электроэнергию. По данной тематике проведено весьма большое количество исследований как методических, так и практических. Некоторые из них рассматриваются в [7–11].

Вместе с тем представляется, что технология АП не менее актуальна и для теплоснабжающих систем (ТСС), которые обладают гораздо большим по сравнению с ЭЭС потенциалом энергосбережения, особенно на территориях с холодным климатом. В последние годы внимание к этой теме значительно возросло. Перспективность применения технологии АП в сфере теплоснабжения подтверждается рядом исследований по данной тематике, проводимых в последнее время. Это связано в том числе и с переходом ТСС на новый технологический уровень, соответствующий упомянутому выше системам теплоснабжения 4-го поколения (4GDH systems) [12–14]. L. Brand (Brange) и соавторы в работах [15] и [16] рассматривают различные методические аспекты функционирования АП в составе ТСС. Авторы предлагают методические разработки для оценки эффективности области применения АП в этих системах, рассматривают некоторые схемы подключения АП к централизованным системам. Результаты практических расчетов получены для системы теплоснабжения в г. Мальме, Швеция. Аналогичные исследования, но с разработкой оригинальных моделей, представлены в статье Н. Kauko и соавторов [17]. В данной работе приводится методическое обеспечение для моделирования локальной централизованной ТСС с участием АП, а вычислительный эксперимент проводится для условий Норвегии.

Научно-методические наработки по различным аспектам внедрения и функционирования АП в составе ТСС в настоящее время постоянно пополняются новыми результатами, что требует периодической актуализации обзора и анализа исследований в этой области.

Научная новизна. В предыдущих публикациях авторов настоящей работы была предложена модель оптимальной загрузки централизованных источников тепловой энергии (ТСС) и собственных ИТ АП, функционирующих в составе ТСС [18, 19]. Источник АП обеспечивает дополнительную тепловую мощность и временную избыточность, что позволяет сократить или полностью компенсировать недоотпуск тепловой энергии потребителю в аварийных состояниях системы, а также снизить нагрузку на централизованную тепловую сеть (ТС) в таких режимах, тем самым по-

вышая качество и надежность теплоснабжения всех потребителей системы (не только АП). Настоящее исследование посвящено разработке методов обеспечения надежности теплоснабжения АП с учетом тепловой мощности собственного ИТ. В рамках этой проблемы рассматривается одна из задач, постановка которой заключается в поиске оптимального соотношения параметров надежности элементов системы и активного временного резерва АП, обеспечиваемого собственной генерацией тепловой энергии.

1. Методология

Рассматриваемая проблема заключается в определении оптимального соотношения значений параметров надежности элементов ТСС (*интенсивностей отказов и/или восстановлений*) и мощности собственного ИТ АП, обеспечивающих требуемый уровень надежности теплоснабжения при минимальных суммарных затратах на обеспечение надежности системы и эксплуатацию собственных ИТ АП. Решение поставленной задачи осуществляется на основе *интегрального параметра надежности* элементов системы. Этот показатель представляет собой усредненное по всем элементам (или некоторой исследуемой группе элементов) значение интенсивности отказов или восстановлений, при котором обеспечивается выполнение требуемого (нормативного) уровня показателя надежности (ПН). Требования к надежности теплоснабжения потребителей могут быть установлены на основе различных ПН, отражающих те или иные свойства. В рамках данного исследования используются два основных *узловых ПН* [20] – вероятность безотказной работы (ВБР) и коэффициент готовности (КГ).

Математическая постановка сформулированной выше задачи представляется следующими выражениями.

Найти:

$$Z_{obj} = \sum_{j \in J} [f_j(\Delta \varepsilon_j) + f(q'_j)] + \sum_{n \in N} f_n(\lambda_n) \rightarrow \min \quad (1)$$

при следующих условиях и ограничениях:

$$\bar{\lambda}_j = \frac{\ln(1/R_{0j})}{\tau_0} [(1 - S(1 - K_{0j})) \sum_{s \in E} M_s^{\alpha_j}]^{-1} \times \sum_{s \in E} L_s^{\alpha_j}, \quad (2)$$

$$M_s = \left[\frac{1 - \bar{q}_{sj} + (\varphi_j t_{sj}/q_{0j})}{1 - \omega_j} \right] - \left[\frac{\varphi_j (C_1 - C_2 \exp B_j)}{C_3 q_{0j} (1 - \omega_j) (1 - \exp B_j)} \right], \quad (3)$$

$$L_s = \left[\frac{1 - (1/q_{0j})}{1 - \omega_j} \right] \times \left[q_{sj} + \varphi_j t_{sj} - \frac{\varphi_j (C_1 - C_2 \exp B_j)}{C_3 (1 - \exp B_j)} \right], \quad (4)$$

$$C_1 = t_{0j} (1 - \bar{q}_{sj}), \quad C_2 = t_{j\min} - t_{0j} \bar{q}_{sj}, \quad C_3 = 1 - \bar{q}_{sj}, \quad (5)$$

$$\bar{q}_{sj} = q_{0j}/(q_{sj}^{\text{sys}} + q'_{sj}), \quad (6)$$

$$B_j = 1/[\bar{\mu}_j(\varepsilon_j + \Delta\varepsilon_j)], \quad (7)$$

$$\bar{\lambda}_j \sum_{s \in E} p_s = \sum_{n \in N} \sum_{s \in E_n} \lambda_n p_s, \quad (8)$$

$$\bar{\mu}_j \sum_{s \in E} p_s = \sum_{n \in N} \sum_{s \in E_n} \mu_n p_s, \quad (9)$$

$$p_s \sum_{n \in N_s} (\lambda_n + \mu_n) = \sum_{z \in E_s} p_z \sum_{n \in N_z} (\lambda_n + \mu_n), \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_s \mathbf{x}_s = \mathbf{g}_s, \quad (11)$$

$$\bar{\mathbf{A}}_s^m \mathbf{p}_s = \mathbf{h}_s - \mathbf{H}_s, \quad (12)$$

$$\mathbf{S} \mathbf{X}_s \mathbf{x}_s = \mathbf{h}_s, \quad (13)$$

$$\lambda_n^{\min} \leq \lambda_n \leq \lambda_n^{\max}, \quad (14)$$

$$\mu_n^{\min} \leq \mu_n \leq \mu_n^{\max}. \quad (15)$$

Здесь: j – номер потребителя ТСС (включая АП); J – множество потребителей системы; n – номер элемента системы; N – множество элементов системы; N_s – подмножество элементов системы, отказ или восстановление которых соответствует прямому (без промежуточных состояний) переходу системы из состояния s в некоторое другое состояние z ; N_z – подмножество элементов системы, отказ или восстановление которых соответствует прямому (без промежуточных состояний) переходу из состояния z в некоторое другое состояние s ; s, z – номера состояний системы; E – полное множество состояний системы; E_s – подмножество состояний системы, из которых возможен прямой (без промежуточных состояний) переход в состояние s ; E_n – подмножество состояний системы, переход из которых связан с отказом или восстановлением элемента n ; Z_{obj} – целевая функция, \$; $f_j(\Delta\varepsilon_j)$ – функция затрат на обеспечение пассивного временного резерва АП (тепловые аккумуляторы и теплоаккумулирующий эффект за счет мощностей собственных ИТ), \$; $f_j(q'_{sj})$ – функция затрат на обеспечение дополнительного активного временного резерва АП за счет мощностей собственных ИТ, \$; $f_n(\lambda_n)$ – функция затрат на обеспечение необходимой интенсивности отказов элементов системы (резервирование, применение более надежного оборудования, создание более надежных структур технологических узлов и т. д.), \$; $\bar{\lambda}_j$ – интегральная (усредненная по элементам) интенсивность отказов элементов системы относительно потребителя j , 1/ч; $\bar{\mu}_j$ – интегральная (усредненная) интенсивность восстановлений элементов системы относительно потребителя, 1/ч; K_{0j}, R_{0j} – нормативные (требуемые) уровни узловых (относительно потребителя j) КГ и ВБР соответственно; τ_0 – момент времени, соответствующий полному (суммарному) количеству часов расчетного периода (как правило, отопительного периода или года), ч; q_{0j} – расчетная (максимальная) тепловая нагрузка потребителя j , ГДж/ч; q_{sj} – уровень подачи тепловой энергии потребителю j в состоянии s системы, ГДж/ч; \bar{q}_{sj} – относительная

подача тепловой энергии потребителю j в состоянии s системы ($\bar{q}_{sj} = q_{sj}/q_{0j}$); q_{sj}^{sys} – часть тепловой нагрузки потребителя j , покрываемая из системы (централизованными ИТ) в состоянии s системы, ГДж/ч; q'_j – производительность собственного ИТ АП j , ГДж/ч; φ_j – коэффициент удельных тепловых потерь для потребителя j , ГДж/(ч°C); t_{sj} – текущая (фактическая) температура внутреннего воздуха для потребителя j в состоянии s системы, °C; ω_j, α_j – коэффициенты неравномерности графика тепловой нагрузки потребителя j [21]; t_{0j} – расчетная температура внутреннего воздуха для потребителя j , °C; $t_{j\min}$ – минимально допустимая температура внутреннего воздуха для потребителя j , °C; ε_j – коэффициент тепловой аккумуляции потребителя j , ч; $\Delta\varepsilon_j$ – дополнительный пассивный временной резерв АП, ч; p_s и p_z – вероятности состояний s и z системы соответственно; λ_n и μ_n – интенсивности отказов и восстановлений элемента n соответственно, 1/ч; $\lambda_j^{\min}, \lambda_j^{\max}$ – ограничения на технически возможные значения интенсивностей отказов элемента n , 1/ч; $\mu_j^{\min}, \mu_j^{\max}$ – ограничения на технически возможные значения интенсивностей восстановлений элемента n , 1/ч; \mathbf{A}_s – матрица соединений линейно независимых узлов ТС при условиях аварийного состояния s системы (с учетом отказа какого-либо элемента) [22]; \mathbf{x}_s – вектор расходов теплоносителя на ветвях сети при условиях аварийного состояния s системы, т/ч; \mathbf{g}_s – вектор расходов в узлах сети при условиях аварийного состояния s системы, т/ч; $\bar{\mathbf{A}}_s^m$ – полная транспонированная матрица соединений узлов и ветвей ТС при условиях аварийного состояния s системы; \mathbf{p}_s – вектор узловых давлений в ТС при условиях аварийного состояния s системы, Па; \mathbf{h}_s – вектор потерь напоров на ветвях сети в состоянии s системы, Па; \mathbf{H}_s – вектор действующих напоров на источниках при условиях аварийного состояния s системы, Па; \mathbf{S}, \mathbf{X}_s – диагональные матрицы, составленные из коэффициентов гидравлических сопротивлений ветвей сети и абсолютных значений расходов теплоносителя на этих ветвях соответственно [22]; $L_s, M_s, C_1, C_2, C_3, B_j$ – принятые в формулах сокращения.

2. Вычислительный эксперимент

Рассматривается схема ТСС, представленная на рис. 1. Теплоснабжение осуществляется на базе ТЭЦ мощностью 135 ГДж/ч по ТС с кольцевыми структурами. Всего к системе подключено 9 потребителей (узлы 1–3, 7–10 и 12, 13) с суммарной нагрузкой, равной 132 ГДж/ч, в том числе АП в узле 3. ТС состоит из 14 участков суммарной протяженностью 1150 м с характеристиками, указанными на рис. 1. Расчетная схема ТСС для анализа надежности, представленная на рис. 2, сформирована на основе исходной схемы (см. рис. 1).

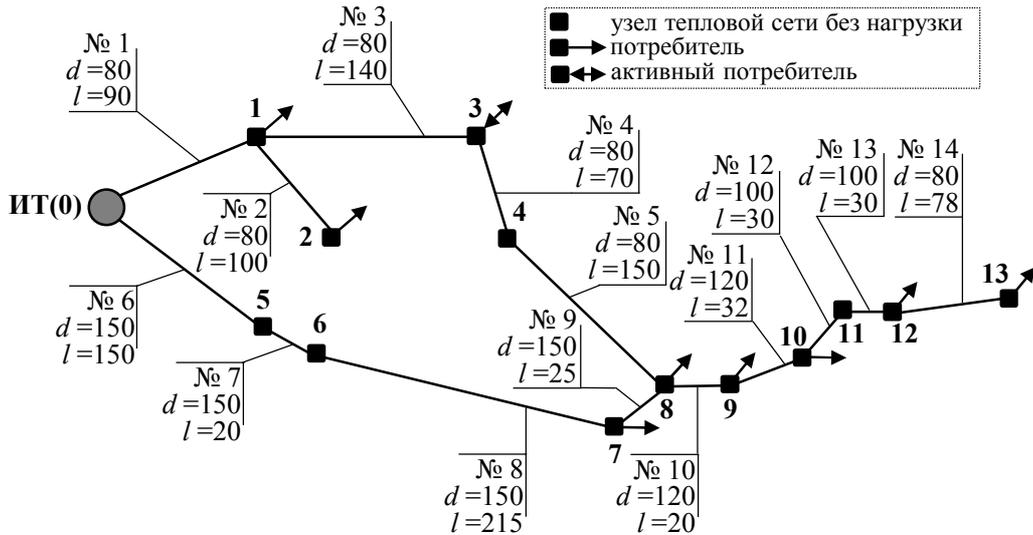


Рис. 1. Исследуемая тестовая схема ТСС (на выносах: d – диаметр участка сети, мм; l – длина участка сети, м)

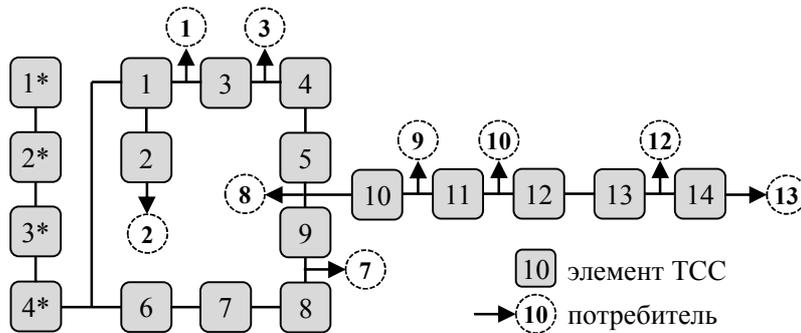


Рис. 2. Расчетная схема ТСС для анализа надежности

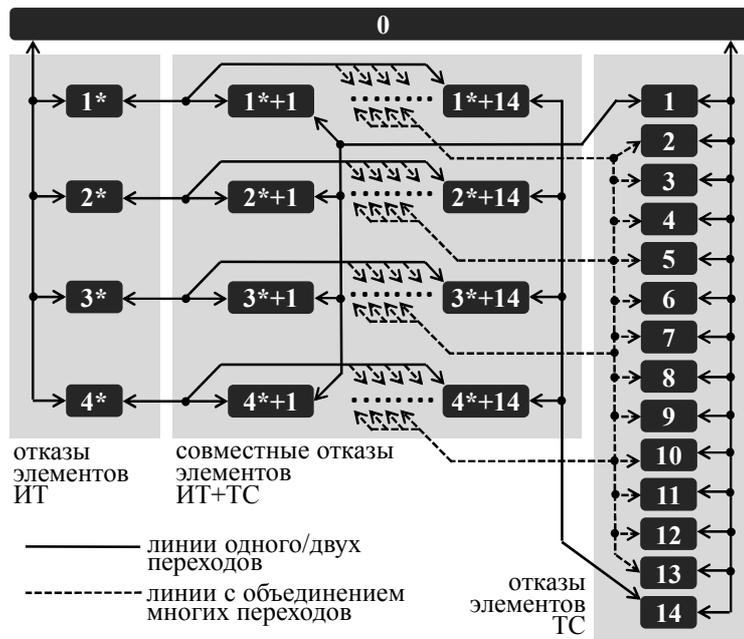


Рис. 3. Граф состояний ТСС и переходов между ними в сокращенном виде (соответствует схеме на рис. 2): 0 – полностью работоспособное состояние системы; 1*-4* – состояния отказов элементов ИТ; 1-14 – состояния отказов элементов ТС; состояния со знаком «+» соответствуют комбинации отказов источника и сети

На расчетной схеме номера 1*–4* относятся к агрегированным основным технологическим элементам централизованного ИТ.

Условия моделирования, описывающие возможные отказы в системе, определяются стационарным марковским случайным процессом, согласно которому параметры надежности элементов и вероятности состояний системы не изменяются во времени в рамках расчетного периода. При этом принимается условие о возможности состояний с одновременным отказом не более двух элементов различных подсистем ТСС – ИТ и ТС. Это позволяет повысить точность результатов анализа надежности и их соответствие реальным условиям эксплуатации с учетом потока неординарных событий при параллельном функционировании подсистем ТСС. Граф состояний и переходов между ними, соответствующий описанным выше условиям, представлен в сокращенном виде на рис. 3. В нем представлены три группы состояний: отказы элементов ИТ, отказы элементов ТС и совместные отказы ИТ и ТС.

Целевая функция (1) задана как сумма степенных зависимостей, определяющих функции затрат на обеспечение требуемых интенсивностей отказов элементов системы (в данном примере интенсивности восстановлений элементов заданы постоянными, т. е. их изменение не рассматривается), и эксплуатационных затрат ИТ АП в различных режимах (рассматривается ИТ на органическом топливе) [18]. Первая компонента целевой функции определена на основе анализа данных о затратах на резервирование элементов ТСС (главным образом, участков ТС как менее надежных элементов по сравнению с оборудованием ИТ) и/или затрат на их замену на более надежные элементы [19].

Согласно методологии, представленной в разделе 1, задача заключается в поиске интенсивностей отказов элементов рассматриваемой схемы ТСС, соответствующих оптимальному решению, при котором требуемый уровень ПН достигается при минимальных затратах на обеспечение надежности и эксплуатации ИТ АП. Расчет производит-

ся согласно модели (1)–(15) по следующему алгоритму:

1) вероятности состояния рассматриваемой системы определяются по марковской модели (10);

2) уровни подачи тепла потребителям в аварийных режимах ТСС рассчитываются по уравнениям (11)–(13) с учетом реализации различных отказов элементов системы согласно графу состояний (см. рис. 3);

3) интегральная интенсивность отказов элементов ТСС определяется по выражениям (2)–(5) при обеспечении заданных требований к ПН (КГ и/или ВБР) с учетом компонент (6) и (7), определяющих резервные функции АП;

4) интегральная интенсивность отказов распределяется между элементами системы согласно условиям (8) и (9) при минимизации целевой функции (1) в диапазоне допустимых значений параметров надежности (14)–(15).

Расчеты проведены с использованием программного обеспечения GAMS и Maple. Результаты представлены в табл. 1 и на рис. 4 для двух заданных значений ВБР – 0,92 и 0,90. На диаграммах, представленных на рис. 4, пунктирной линией показана зависимость между интегральной интенсивностью отказов элементов и мощностью собственного ИТ АП, а сплошной линией – приведенные затраты на обеспечение надежности при различных соотношениях параметров, заданных пунктирной линией. Для обеспечения более высокого уровня надежности теплоснабжения потребителя, соответствующего ВБР, равной 0,92 (соответствует частоте нарушений теплоснабжения потребителей 0,08 1/год или 1 раз в 12 лет), значение интегральной интенсивности отказов элементов должно составлять не более 0,38 1/ч, а производительность собственного ИТ АП составлять 67 % от его тепловой нагрузки. Общая стоимость обеспечения надежности в этом случае составляет 1,95 млн \$. Требования к надежности, соответствующие меньшему уровню ВБР, равному 0,90 (соответствует частоте нарушений теплоснабжения потребителей 0,1 1/год или 1 раз в 9,5 лет), достигаются при значении интегральной интенсивности отказов

Таблица 1
Результаты оптимизации надежности ТСС
с учетом функционирования собственного ИТ АП

Решение для ВБР = 0,92							
Интегральная интенсивность отказов элементов, 1/ч	0,21	0,24	0,27	0,31	0,38	0,52	0,63
Мощность ИТ АП, %	5	20	35	50	67	84	94
Затраты на надежность, млн \$	3,73	3,12	2,58	2,27	1,95	2,52	3,17
Решение для ВБР = 0,90							
Интегральная интенсивность отказов элементов, 1/ч	0,21	0,24	0,27	0,31	0,38	0,52	0,63
Мощность ИТ АП, %	5	20	35	50	67	84	94
Затраты на надежность, млн \$	3,64	2,97	2,50	2,21	1,73	1,51	1,68

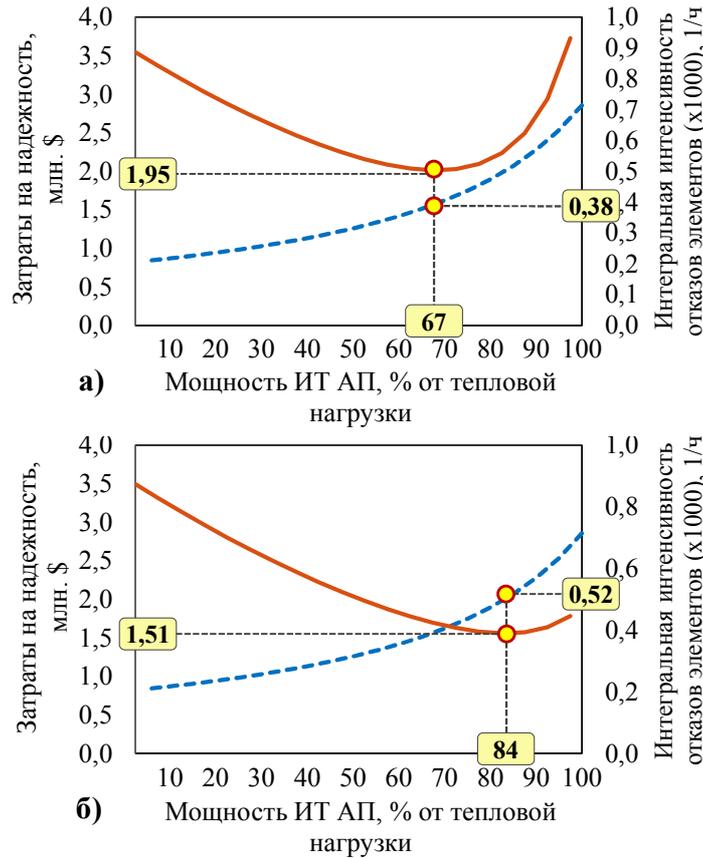


Рис. 4. Поиск оптимального соотношения мощности ИТ АП и интегральной интенсивности отказов элементов ТСС для обеспечения требуемого уровня надежности теплоснабжения: а – для ВБР = 0,92; б – для ВБР = 0,90

элементов, равной 0,52 1/ч и производительности ИТ АП на уровне 84 % от его тепловой нагрузки. Стоимость обеспечения надежности в этом случае составляет 1,51 млн \$.

С одной стороны, очевидно, что для более высоких требований к надежности (для ВБР, равной 0,92) необходимо обеспечить более высокие параметры надежности элементов относительно решения для более низкого требования к надежности

(для ВБР, равной 0,90). При этом изменение мощности ИТ АП для тех же решений имеет противоположную динамику: при более высоких требованиях к надежности уровень загрузки ИТ АП ниже, чем при более низких.

Распределение интегральных значений интенсивности отказов среди элементов ТСС показано на рис. 5 для двух рассмотренных ранее значений ВБР. Это распределение получено в соответствии

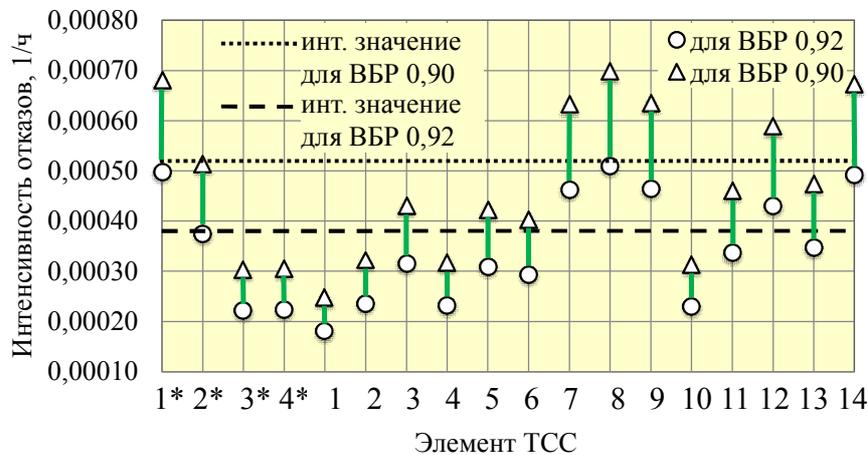


Рис. 5. Оптимальное распределение интегральных значений интенсивностей отказов по элементам ТСС для двух уровней требований к надежности

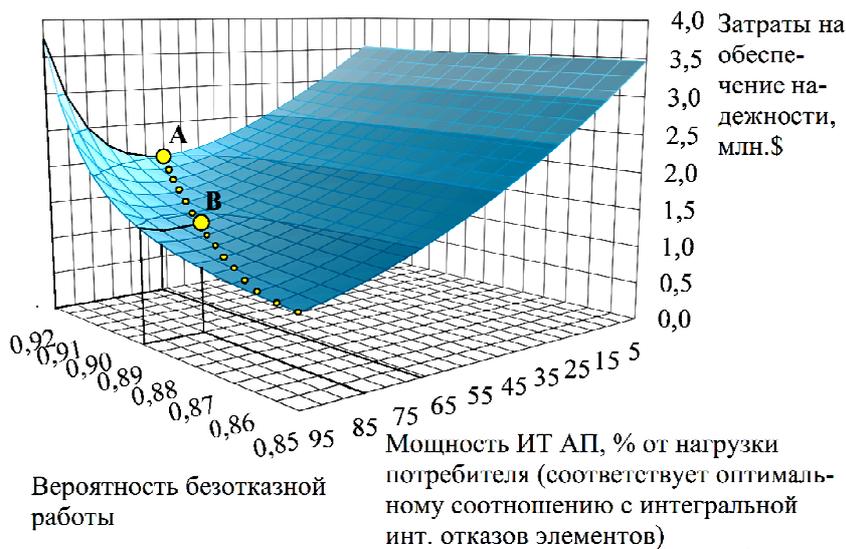


Рис. 6. Область решения задачи обеспечения надежности ТСС в зависимости от различных требований к уровню надежности теплоснабжения АП по значениям ВБР (точки на поверхности представляют собой линию оптимальных решений, соответствующих минимальной стоимости обеспечения надежности)

с условиями (8) и (9) при минимальных суммарных затратах на обеспечение надежности теплоснабжения потребителей (включая АП) согласно целевой функции (1). В результате серии расчетов для разных уровней требуемого уровня ВБР получена обобщенная характеристика, представленная в виде диаграммы на рис. 6.

Диаграмма на рис. 6 представляет собой поверхность оптимальных решений, построенную по трем параметрам: затратам на обеспечение надежности (целевая функция), мощности ИТ АП и требуемого значения ВБР. Точки А и В на этой поверхности соответствуют рассмотренным выше решениям (см. рис. 4 и табл. 1). Линия с точками на графике соответствует множеству оптимальных решений в рамках заданного диапазона параметров задачи и значений ВБР. Из представленной диаграммы видно, что при уменьшении мощности ИТ АП затраты на обеспечение надежности значительно возрастают и практически постоянны для различных значений ВБР. В то же время функционирование ИТ АП с высокой долей покрытия тепловой нагрузки потребителя (около 90–100 %) для обеспечения высокого уровня надежности (в рассматриваемом диапазоне значений ВБР от 0,90 до 0,92) является неэффективным, так как приводит к более высоким затратам по сравнению с сочетанием функционирования собственного ИТ и уменьшением интенсивности отказов элементов системы.

Заключение

Проведенное исследование посвящено решению одной из множества задач в области анализа и синтеза надежности теплоснабжения потребителей в условиях развития ТСС 4-го поколения (4GDH systems) в рамках формирования интегрированных

интеллектуальных энергетических систем. Рассмотренные задачи надежности и подходы являются частью более общей проблематики по созданию комплексной (учитывающей различные этапы производства и распределения тепловой энергии, технологии) методологии для принятия оптимальных решений как на этапе проектирования, так и эксплуатации централизованно-распределенных ТСС с использованием новых энергоэффективных технологий, ключевой из которых является АП с собственной генерацией энергии.

Использование технологии АП в ТСС позволяет увеличить временную и функциональную избыточность как для самого потребителя, так и для всей системы в целом. При функционировании собственного ИТ АП в составе ТСС возникает задача обеспечения надежности его теплоснабжения как за счет элементного резерва системы, так и тепловой мощности собственного ИТ. В рамках данного исследования рассматривается одна из возможных постановок такой задачи, которая заключается в поиске оптимального соотношения параметров надежности элементов системы (как, например, в рассмотренном вычислительном примере интенсивностей отказов) и мощности распределенных ИТ АП, позволяющих полностью или частично покрывать их тепловую нагрузку. Критерием оптимизации является минимум суммарных затрат на обеспечение надежности, включая затраты на резервирование элементов системы и эксплуатацию ИТ. Требования к надежности теплоснабжения определяются основными узловыми ПН – КГ и ВБР, которые учитывают различные свойства надежности.

Проведен вычислительный эксперимент на основе тестовой схемы ТСС с одним АП, имею-

щим собственный ИТ. Полученные результаты позволяют предварительно сформулировать некоторые особенности функционирования АП в составе ТСС. В частности, можно заключить, что наиболее эффективная область применения распределенных ИТ соответствует не полному покрытию нагрузок потребителей, а на уровне 60–80 % (в зависимости от требований надежности). Это обеспечивает, с одной стороны, снижение нагрузки потребителя на систему, а с другой – компенсирует недостаток тепловой энергии в аварийных режимах работы системы (в случае отказов элементов системы). И то и другое значительно повышает надежность теплоснабжения как самих АП, так и надежность всей системы, охватывая «неактивных» потребителей, у которых нет собственных ИТ и других активных резервов. Кроме того, в период максимальных тепловых нагрузок (при минимальных наружных температурах) ИТ АП может работать как пиковый источник, снижая

нагрузку на централизованные ИТ и вероятность аварийных состояний, связанных с отказами оборудования, работающего в такие периоды на предельных режимах.

Дальнейшие исследования в рамках данного направления связаны прежде всего с определением оптимального количества АП в системе, технологическими и режимными аспектами их подключения к централизованной системе, учетом более широкого применения различных способов обеспечения надежности в системе, включая структурное резервирование ТС, функциональное резервирование ИТ АП с учетом возможности отпуска тепловой энергии в систему, моделирование аккумуляторов тепловой энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-08-00488 А.

Литература/References

1. Lund H., Østergaard P., Connolly D., Mathiesen B. Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 2015, vol. 137, pp. 556–565. DOI: 10.1016/j.energy.2017.05.123
2. Lund H., Duic N., Østergaard P., Mathiesen B. Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy*, 2016, vol. 110, pp. 1–4. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.105
3. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy*, 2014, vol. 65, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041
4. Perkovic L., Mikulcic H., Duic N. Multi-objective optimization of a simplified factory model acting as a prosumer on the electricity market. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 167, pp. 1438–1449. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.078
5. Ottesen Ødegaard S., Tomasgard A., Fleten S.-E. Prosumer bidding and scheduling in electricity markets. *Energy*, 2016, vol. 94, pp. 828–843. DOI: 10.1016/j.energy.2015.11.047
6. Yang H., Xiong T., Qiu J., Qiu D., Yang Dong Z. Optimal operation of DES/CCHP based regional multi-energy prosumer with demand response. *Applied Energy*, 2016, vol. 167, pp. 353–365. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.022
7. Hwang J., Choi M., Lee T., Jeon S., Kim S., Park S. Energy Prosumer Business Model Using Blockchain System to Ensure Transparency and Safety. *Energy Procedia*, 2017, vol. 141, pp. 194–198. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.11.037
8. Zhang N., Yan Y., Su W. A game-theoretic economic operation of residential distribution system with high participation of distributed electricity prosumers. *Applied Energy*, 2015, vol. 154, pp. 471–479. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.011
9. Zafar R., Mahmood A., Razaq S., Ali W., Naeem U., Shehzad K. Prosumer based energy management and sharing in smart grid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 82, pp. 1675–1684. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.018
10. Vergados D.J., Mamounakis I., Makris P., Varvarigos E. Prosumer clustering into virtual microgrids for cost reduction in renewable energy trading markets. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2016, vol. 7, pp. 90–103. DOI: 10.1016/j.segan.2016.06.002
11. Prakash L., Sugatha Kumari P.R., Chandran S., Sachin Kumar S., Soman K.P. Self-sufficient Smart Prosumers of Tomorrow. *Procedia Technology*, 2015, vol. 21, pp. 338–344. DOI: 10.1016/j.protecy.2015.10.044
12. Lund H., Werner S., Wiltshire R., Svendsen S., Thorsen J.E., Hvelplund F., Mathiesen B.V. 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy*, 2014, vol. 68, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.energy.2014.02.089
13. Lund H., Duic N., Østergaard P., Mathiesen B. Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy*, 2016, vol. 110, pp. 1–4. DOI: 10.1016/j.energy.2016.07.105
14. Lund H., Østergaard P., Chang M., et al. The status of 4th generation district heating: Research and results. *Energy*, 2018, vol. 164, pp. 147–159.
15. Brange L., Englund J., Lauenburg P. Prosumers in district heating networks – A Swedish case study. *Applied Energy*, 2016, vol. 164, pp. 492–500. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.12.020

16. Brand L., Calvén A., Englund J., Landersjö H., Lauenburg P. Smart district heating networks – A simulation study of prosumers' impact on technical parameters in distribution networks. *Applied Energy*, 2014, vol. 129, pp. 39–48. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.04.079
17. Kauko H., Kvalsvik K.H., Rohde D., Nord N., Utne A. Dynamic modeling of local district heating grids with prosumers: A case study for Norway. *Energy*, 2018, vol. 151, pp. 261–271. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.033
18. Postnikov I., Stennikov V., Penkovskii A. Prosumer in the District Heating Systems: Operating and Reliability Modeling. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 2530–2535. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.411
19. Postnikov I. Methods for optimization of time redundancy of prosumer in district heating systems. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, no. 2, p. 214–220. DOI: 10.1016/j.egypr.2019.11.065
20. Сеннова Е.В., Смирнов А.В., Ионин А.А. и др. Надежность систем теплоснабжения. Новосибирск: Наука, 2000. 351 с. [Sennova E.V., Smirnov A.V., Ionin A.A. and other. *Reliability of heat supply systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 351 p.]
21. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1985. 222 с. [Sennova E.V., Sidler V.G. *Mathematical modeling and optimization of developing heat supply systems*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1985. 222 p.]
22. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. Москва: Наука, 1985. 272 с. [Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Theory of hydraulic circuits*. Moscow, Nauka Publ., 1985. 272 p.]

Постников Иван Викторович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск; postnikov@isem.irk.ru.

Поступила в редакцию 20 октября 2020 г.

DOI: 10.14529/power210201

OPTIMIZATION OF HEAT SUPPLY RELIABILITY WITH ACCOUNT TO THE ACTIVE CONSUMER FUNCTIONS

I.V. Postnikov, postnikov@isem.irk.ru

Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

The article considers the problem of analyzing and optimizing the reliability of heat supply to an active consumer (AP) of thermal energy in heat supply systems (HSS), taking into account their additional thermal power provided by their own sources of thermal energy (IT). The stated scientific and methodological problem consists in determining the optimal ratio of the values of the reliability parameters of the HSS elements (failure rates and / or restorations) and the power of the own IT AP, which ensures the required level of reliability of heat supply with minimal total costs to ensure the elemental reliability of the system and the operation of its own IT AP. The authors propose solutions based on the use of the theory of reliability, models of Markov random processes, some regularities of the theory of probability, nodal PN, models of the theory of hydraulic circuits and enlarged regularities of thermophysical processes occurring during heat supply to consumers. A computational experiment was carried out using the developed methods based on the TSS test circuit with characteristics close to real systems, providing the basis for conclusions and directions for further research.

Keywords: heat supply system, active consumer, analysis and optimization of reliability, integral parameter of reliability of elements, Markov random process, key indicators of reliability, hydraulic circuit theory.

Received 20 October 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Постников, И.В. Оптимизация надежности теплоснабжения с учетом функций активного потребителя / И.В. Постников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 5–13. DOI: 10.14529/power210201

FOR CITATION

Postnikov I.V. Optimization of Heat Supply Reliability with Account to the Active Consumer Functions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 5–13. (in Russ.) DOI: 10.14529/power210201