

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМ

И.В. Постников<sup>1</sup>, В.А. Стенников<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Россия  
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6583-1142>, [postnikov@isem.irk.ru](mailto:postnikov@isem.irk.ru)

**Резюме:** Предлагается методика определения оптимальных параметров надежности (интенсивностей отказов и восстановлений) элементов теплоснабжающей системы, обеспечивающих требуемый уровень надежности теплоснабжения потребителей. Методология решения поставленной задачи основана на использовании методов теории гидравлических цепей, узловых показателей надежности, марковского случайного процесса и общих закономерностей теплофикации и процессов теплопередачи. Приводятся результаты расчетного эксперимента, подтверждающего работоспособность изложенной методики для схем реальных теплоснабжающих систем.

**Ключевые слова:** теплоснабжающая система, оптимизация надежности, узловые показатели надежности, элементная надежность, интенсивности отказов и восстановлений элементов, интегральные параметры надежности.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-38-00399 мол\_а.

## ENSURING OF PARAMETRIC RELIABILITY OF HEAT SUPPLY SYSTEMS

I.V. Postnikov<sup>1</sup>, V.A. Stennikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, Russia  
ORCID:<http://orcid.org/0000-0002-6583-1142>, [postnikov@isem.irk.ru](mailto:postnikov@isem.irk.ru)

**Abstract:** The paper suggests a methodology to determine optimal reliability parameters (failure and restoration rates) of heat supply system components, which provide the required level of heat supply reliability. The methodology of solving the stated problem is based on the methods of the theory of hydraulic circuits, nodal reliability indices of heat supply, models of Markov random process and general regularities of cogeneration and heat transfer processes. The results of the practical research based on the calculation experiment that confirms the viability of the presented methodology for the schemes of real heat supply systems are presented.

**Keywords:** heat supply system, reliability optimization, nodal reliability indices, component reliability, component failure and restoration rates, average reliability parameters

**Acknowledgements:** This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (RFBR) according to the research project No. 16-38-00399 mol\_a.

### Постановка задачи оптимизации элементной надежности ТСС

Повышение или обеспечение заданных значений параметров надежности элементов теплоснабжающих систем (ТСС) осуществляется за счет снижения интенсивностей их отказов и повышения интенсивностей восстановления (сокращения времени восстановления). Реализация первого направления достигается заменой элементов на более надежные и/или их резервированием (дублированием, использованием горячего резерва); второе направление может быть реализовано за счет расширения ремонтных бригад, оснащения автоматизированными системами обнаружения и локализации аварий, оптимального управления послеаварийными гидравлическими режимами в тепловых сетях (ТС) и других мероприятий, позволяющих сократить время устранения отказов.

Методическая постановка задачи оптимизации элементной надежности ТСС состоит в определении таких параметров надежности ее элементов (интенсивностей отказов и восстановления), которые обеспечивают требуемый уровень надежности теплоснабжения потребителей при минимальных затратах на достижение этих параметров и ограничений на технически возможные их значения.

В соответствии с методикой анализа надежности ТСС, представленной в [1], требуемый уровень надежности теплоснабжения потребителей определяется нормативными значениями двух узловых показателей надежности (ПН): коэффициента готовности  $K_j^0$  и вероятности безотказной работы  $R_j^0$ , заданных для всех  $j \in J$ , где  $j$  – номер потребителя, а  $J$  – множество потребителей.

Относительно этих ПН осуществляется решение поставленной задачи, методика которого состоит из трех основных этапов.

1. Определение зависимости между интегральными параметрами надежности элементов ТСС.
2. Моделирование послеаварийных режимов ТСС.
3. Формализация задачи определения оптимальных параметров надежности элементов ТСС.

### Методика оптимизации элементной надежности ТСС

*1. Определение зависимости между интегральными параметрами надежности элементов ТСС*

Под *интегральным параметром надежности* элементов понимается интенсивность их отказов или восстановлений, имеющая одинаковое (усредненное) для этих элементов значение, при котором обеспечивается требуемый уровень ПН. В настоящей методике интегральные параметры надежности предлагается определять на основе формул для расчета ПН с учетом их нормативных (требуемых) значений. Далее приводится вывод соответствующих зависимостей.

Вероятность безотказной работы для потребителя  $j$  определяется по следующей формуле, основанной на зависимости, представленной в методике узловой оценки надежности ТСС [1]:

$$R_j = \exp \left( - p_0 \sum_{s \in E} \sum_{i \in I'(s)} \tau_{sj} \lambda_i \right), \quad (1)$$

где  $p_0$  – вероятность полностью работоспособного состояния ТСС (далее – системы);  $s$  – номер состояния системы;  $\tau_{sj}$ , часть отопительного периода, в рамках которой реализация состояния  $s$  системы приводит к нарушению теплоснабжения потребителя  $j$ , ч;  $\lambda_i$  – интенсивность отказов элемента  $i$ ,  $1/\text{ч}$ ;  $E$  – полное множество состояний системы;  $I'(s)$  –

подмножество элементов системы, отказ которых соответствует переходу в состояние  $s$ . При условии, что вероятность состояний с одновременным отказом более одного элемента пренебрежимо мала, множества элементов и состояний системы идентичны; в более общем случае, особенно при рассмотрении ТСС как совокупности ИТ и ТС, целесообразно учитывать состояния с одновременным отказом нескольких (как правило, не более двух) элементов.

Вероятность  $p_0$ , как и остальные вероятности системы, определяются из решения системы уравнений, описывающих стационарный марковский процесс [2, 3]:

$$p_s \left( \sum_{i \in I(s)} \lambda_i + \sum_{i \in I(s)} \mu_i \right) = \sum_{z \in E(s)} \left( \sum_{i \in I(z)} p_z \lambda_i + \sum_{i \in I(z)} p_z \mu_i \right), \quad s \in E, \quad (2)$$

где  $p_s$  и  $p_z$  – вероятности состояний системы;  $\mu_i$  – интенсивность восстановления элемента  $i$ , 1/ч;  $I(s)$  – подмножество элементов системы, отказ или восстановление которых соответствует непосредственному (без промежуточных состояний) переходу системы из состояния  $s$  в какое-либо другое состояние  $z$ ;  $E(s)$  – подмножество состояний системы, из которых возможен непосредственный переход в состояние  $s$ ;  $I(z)$  – подмножество элементов системы, отказ или восстановление которых соответствует непосредственному переходу системы из состояния  $z$  в какое-либо другое состояние  $s$ .

Более подробно вопросы использования аппарата марковских случайных процессов в задачах надежности ТСС рассмотрены в работах [1, 4–8], среди актуальных исследований по использованию математических методов теории надежности при анализе и обеспечении надежности в энергетике можно выделить работы [9–11].

Подставив в формулу (1) требуемое значение вероятности безотказной работы  $R_j^0$ , получим следующее выражение для расчета интегральной интенсивности отказов элементов системы  $\bar{\lambda}_{jR}$  для потребителя  $j$ :

$$\bar{\lambda}_{jR} = \frac{\ln(1/R_j^0)}{p_0 \sum_{s \in E} \tau_{sj}}. \quad (3)$$

Индекс  $R$  в формуле (3) указывает на соответствие требованиям к вероятности безотказной работы.

Каждому показателю  $\tau_{sj}$  в формулах (1) и (3) соответствует определенный уровень подачи тепловой энергии потребителю  $j$  в состоянии  $s$  системы, который обозначается  $q_{sj}$ , Гкал/ч. Зависимость между этими показателями задается с помощью уравнения Россандера [12], которое с учетом принятых обозначений формулируется следующим образом:

$$q_{sj} = q_{0j} \left[ 1 - (1 - \omega_j) (\tau_{sj} / \tau_0)^{1/\alpha_j} \right], \quad \alpha_j = (1 - \delta_j) / (\delta_j - \omega_j), \quad (4)$$

$$\omega_j = q_{nj} / q_{0j}, \quad \delta_j = q_{cj} / q_{0j},$$

где  $q_{0j}$ ,  $q_{nj}$ ,  $q_{cj}$  – тепловые нагрузки потребителя  $j$ , Гкал/ч: расчетная, в начале отопительного периода, и средняя за отопительный период соответственно;  $\tau_0$  – продолжительность отопительного периода, ч;  $\alpha_j$ ,  $\omega_j$ ,  $\delta_j$  – коэффициенты неравномерности графика тепловой нагрузки потребителя. Следует отметить, что в

исходной интерпретации уравнение Россандера используется для расчета тепловой нагрузки в определенный момент времени отопительного периода, соответствующий заданной температуре наружного воздуха.

Уровень подачи тепла потребителю пропорционален разности температур внутреннего (в помещении) и наружного воздуха, что определяется следующим уравнением [13]:

$$q_{sj} = \varphi_j (t_{sj} - t_n), \quad (5)$$

где  $\varphi_j$  – коэффициент удельных теплопотерь здания потребителя  $j$ , Гкал/(ч $^{\circ}$ С) [13];  $t_{sj}$   $^{\circ}$ С – текущая (фактическая) температура внутреннего воздуха у потребителя  $j$  в состоянии  $s$  системы;  $t_n$  – температура наружного воздуха  $^{\circ}$ С.

Для потребителя  $j$  каждому состоянию  $s$  системы соответствует такая температура наружного воздуха  $t_{nsj}$ ,  $^{\circ}$ С, при которой временной резерв потребителя будет равен времени восстановления его расчетного теплоснабжения. Значение этой температуры определяется по следующей зависимости [1]:

$$t_{nsj} = \frac{t_{0j}(1 - \bar{q}_{sj}) - (t_{j\min} - t_{0j}\bar{q}_{sj})\exp(1/\beta\mu_i^{\max})}{(1 - \bar{q}_{sj})[1 - \exp(1/\beta\mu_i^{\max})]}, \quad (6)$$

где  $t_{0j}$  и  $t_{j\min}$  – расчетная и минимально допустимая температура внутреннего воздуха для потребителя  $j$  соответственно,  $^{\circ}$ С;  $\bar{q}_{sj}$  – относительная подача тепловой энергии потребителю  $j$  в состоянии  $s$  системы, Гкал/ч;  $\bar{q}_{sj} = q_{sj}/q_{0j}$ ;  $\beta$  – коэффициент тепловой аккумуляции зданий, ч;  $\mu_i^{\max}$  – интенсивность восстановления некоторого элемента  $i$ , 1/ч, максимальная из возможных переходов системы в работоспособное для потребителя  $j$  состояние. Временной резерв потребителя связан, главным образом, с теплоаккумулирующими свойствами конструкций зданий. При наличии других типов временного резервирования они также могут быть учтены в методике, в том числе и адаптивные функции активного потребителя в интеллектуальных системах теплоснабжения.

Период стояния наружных температур, определяемых формулой (6), представляет именно ту часть отопительного периода, которая задается величиной  $\tau_{sj}$  в формуле (4).

Далее введем следующие сокращения для упрощения дальнейших преобразований:

$$C_1 = t_{0j}(1 - \bar{q}_{sj}), \quad C_2 = t_{j\min} - t_{0j}\bar{q}_{sj}, \quad C_3 = 1 - \bar{q}_{sj}. \quad (7)$$

Произведем замену величины  $\mu_i^{\max}$  в формуле (6) на интегральную интенсивность восстановлений элементов, определяемую для потребителя  $j$  при выполнении требований по вероятности безотказной работы, и обозначим ее  $\bar{\mu}_{jR}$ , 1/ч. Далее, на основе преобразований выражений (2), (4)–(6) с учетом (7) получим зависимость между интегральными интенсивностями отказов и восстановлений элементов ТСС, определяемых при выполнении требований по вероятности безотказной работы:

$$\bar{\lambda}_{jR} = \frac{\ln(1/R_j^0)}{P_0\tau_0} \times \left[ \sum_{s \in E} \left( \frac{1}{1 - \omega_j} \left( 1 - \bar{q}_{sj} + \frac{\varphi_j t_n}{q_{0j}} - \frac{\varphi_j (C_1 - C_2 \exp(1/\beta \bar{\mu}_{jR}))}{C_3 q_{0j} (1 - \exp(1/\beta \bar{\mu}_{jR}))} \right) \right)^{\alpha_j} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Далее необходимо связать интегральные параметры надежности элементов системы с коэффициентом готовности системы, который для потребителя  $j$  определяется по следующей формуле [1]:

$$K_j = \sum_{s \in E} p_s [(\tau_0 - \tau_{sj}) / \tau_0]. \quad (9)$$

Интервал времени  $\tau_{sj}$  для полностью работоспособного состояния  $p_0$  равен нулю, поэтому суммирование в формуле (9) можно осуществлять по всем состояниям системы за исключением состояния  $s = 0$ . Данное подмножество состояний обозначим через  $E(p)$ . Далее из (9) получим следующее выражение для определения показателя  $\tau_{sj}$ , усредненного по всем состояниям системы и удовлетворяющего выполнению требуемого значения коэффициента готовности  $K_j^0$ :

$$\bar{\tau}_{jK} = \tau_0(1 - K_j^0) / \sum_{s \in E(p)} p_s. \quad (10)$$

Сумма вероятностей состояний системы равна 1, следовательно, с учетом выражения (10) справедливо следующее равенство:

$$p_0 = 1 - \sum_{s \in E(p)} p_s = 1 - [(1 - K_j^0)\tau_0 / \bar{\tau}_{jK}]. \quad (11)$$

После преобразований выражений (4)–(8) и (11) получим зависимость между интегральными параметрами надежности элементов системы (интенсивностью отказов и восстановления) с учетом совместного выполнения требований как по вероятности безотказной работы, так и по коэффициенту готовности:

$$\bar{\lambda}_{jRK} = \frac{1}{\tau_0} [\ln(1/R_j^0)] \times \left( 1 - N_s(1 - K_j^0) / \sum_{s \in E} L_s^{\alpha_j} \right)^{-1} \times \left( \sum_{s \in E} M_s^{\alpha_j} \right)^{-1}, \quad (12)$$

$$L_s = \frac{1}{1 - \omega_j} \left[ 1 - \frac{1}{q_{0j}} \left( q_{sj} + \varphi_j t_H - \varphi_j \frac{C_1 - C_2 \exp(1/\beta \bar{\mu}_{jRK})}{C_3(1 - \exp(1/\beta \bar{\mu}_{jRK}))} \right) \right], \quad (13)$$

$$M_s = \frac{1}{1 - \omega_j} \left( 1 - \bar{q}_{sj} + \frac{\varphi_j t_H}{q_{0j}} - \varphi_j \frac{C_1 - C_2 \exp(1/\beta \bar{\mu}_{jRK})}{C_3 q_{0j} (1 - \exp(1/\beta \bar{\mu}_{jRK}))} \right). \quad (14)$$

Здесь  $N_s$  – количество состояний ТСС;  $\bar{\lambda}_{jRK}$  и  $\bar{\mu}_{jRK}$  – интегральные интенсивности отказов и восстановлений, соответственно, с учетом требований по вероятности безотказной работы и коэффициенту готовности.

## 2. Моделирование послеаварийных режимов ТСС

Расчет послеаварийных режимов в ТСС необходим для определения уровней подачи теплоносителя каждому потребителю при отказах элементов системы. Послеаварийный гидравлический режим определяется установившимся после отключения аварийного элемента потокораспределением в ТС, расчет которого осуществляется с помощью математических методов, разработанных в рамках теории гидравлических цепей [14]. Узловая форма записи модели потокораспределения (гидравлических режимов) в ТС, представленная в матричной форме, имеет вид [12, 14]:

$$A_s x = g_s, \quad (15)$$

$$\bar{A}_s^T p = h - H, \quad (16)$$

$$S X x = h, \quad (17)$$

где  $A_s$  – матрица соединений линейно независимых узлов сети для состояния  $s$  системы,  $x$ , т/ч – вектор расходов теплоносителя на участках сети;  $g_s$ , т/ч – вектор расходов теплоносителя в узлах расчетной схемы;  $\bar{A}_s^T$  – транспонированная матрица  $\bar{A}$ , которая является полной матрицей соединений узлов и ветвей схемы сети;  $p$ , мм в.ст. – полный вектор давлений в узлах сети;  $h$ ,  $H$ , мм в.ст. – векторы потерь напора и действующих напоров на ветвях;  $S$ , м/(ч<sup>2</sup>Т<sup>2</sup>),  $X$ , т/ч – диагональные матрицы гидравлических сопротивлений ветвей, составленные из величин гидравлических сопротивлений ветвей и абсолютных значений расходов на них. Моделирование аварийных ситуаций в ТСС (после локализации отказавшего элемента) производится путем исключения отказавшего элемента из ее расчетной схемы.

### 3. Формализация задачи определения оптимальных параметров надежности элементов ТСС

Принцип разнесения значений интегральных параметров надежности, определяемых по формулам (12)–(14), по элементам системы основан на сохранении сумм произведений параметров надежности и вероятностей состояний системы:

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in E(i)} \lambda_i p_s = \bar{\lambda}_{jRK} \sum_{s \in E} p_s, \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{s \in E(i)} \mu_i p_s = \bar{\mu}_{jRK} \sum_{s \in E} p_s. \quad (19)$$

В выражениях (18) и (19) подмножество  $E(i)$  содержит те состояния системы, из которых возможен переход, связанный с отказом и восстановлением элемента  $i$  соответственно.

Целевая функция задачи оптимизации элементной надежности ТСС выражается следующей суммой:

$$\sum_{i \in I} f_{\lambda_i}(\lambda_i) + \sum_{i \in I} f_{\mu_i}(\mu_i), \quad (20)$$

где  $f_{\lambda_i}(\lambda_i)$  и  $f_{\mu_i}(\mu_i)$ , млн.руб. – функции затрат на обеспечение параметров надежности элементов – интенсивностей их отказов и восстановления соответственно. Определение этих функции представляет собой отдельную задачу и осуществляется, главным образом, методами аппроксимации фактических стоимостных данных о составе оборудования с различными характеристиками надежности, его резервировании, создании аварийно-восстановительных служб (АВС) и прочих способах обеспечения и повышения надежности элементов ТСС [1].

Ограничения на возможные значения параметров надежности элементов задаются в виде следующих неравенств:

$$\lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max}, \quad i \in I, \quad (21)$$

$$\mu_i^{\min} \leq \mu_i \leq \mu_i^{\max}, \quad i \in I. \quad (22)$$

Таким образом, задача оптимизации элементной надежности ТСС заключается в минимизации функции (20) при следующих условиях и ограничениях:

- 1) условия (15)–(17), в соответствии с которыми производится расчет уровней подачи теплоносителя потребителям в различных состояниях системы;
- 2) условие (12)–(14), определяющее связь между интегральными параметрами надежности элементов;
- 3) условия (18) и (19), определяющие принцип разнесения интегральных параметров надежности по элементам системы;
- 4) ограничения (21) и (22) на значения параметров надежности элементов.

При повышении надежности существующей системы принимаются вероятности ее состояний, рассчитанные с помощью модели (2) при фактических параметрах надежности элементов; в случае проектируемой системы могут приниматься вероятности, рассчитанные при любых значениях параметров надежности элементов из диапазона возможных их значений. В любом случае результат оптимизации потребует пересчета (уточнения) вероятностей состояний системы при новых параметрах надежности элементов, полученных при оптимизации. Для реальных систем, как правило, отклонения значений вероятностей состояний системы незначительны в пределах достижимых параметров надежности элементов.

#### Пример оптимизации элементной надежности ТСС

Рассматривается тестовая схема ТСС, (рис. 1, а), состоящая из двух источников тепла (ИТ1, ИТ2), семи потребителей (узлы 1–7) и кольцевой ТС из 18 участков. Упрощенная схема для обоих ИТ, показанная на рис. 1, б, состоит из следующих основных элементов – котла 19, турбины 20, сетевых подогревателей 21 и 23 и сетевых насосов 22 и 24. Указанные номера элементов соответствуют ИТ1, для ИТ2 они назначены по порядку с 25 по 30. В соответствии с комплексным подходом к исследованию надежности теплоснабжения [4–7] расчетная схема ТСС сформирована в виде единой структуры, связывающей элементы схем ИТ и ТС, и показана на рис. 2, а. Элементы 1–18 являются участками сети, элементы 19–30 соответствуют источникам.

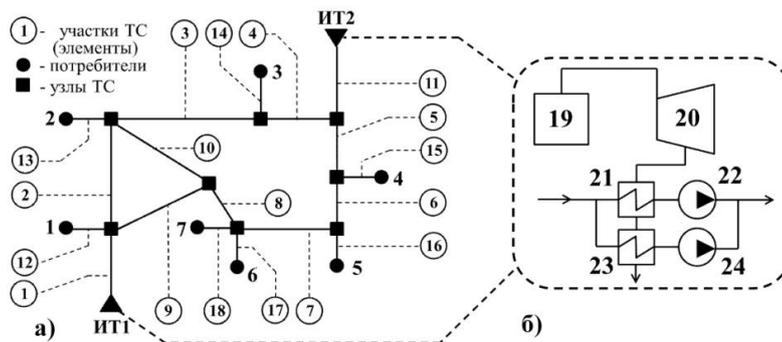


Рис. 1. Тестовая схема ТСС: а) общая схема ТСС; б) упрощенная схема ИТ

Моделирование случайного процесса функционирования ТСС осуществляется при следующих условиях: каждый элемент может находиться в работоспособном и отказовом состояниях, а поток событий в ТСС является простейшим. Ограничимся рассмотрением состояний совместного отказа не более двух элементов из разных подсистем ТСС (ТС, ИТ1 и ИТ2). Таким образом, множество состояний формируется состояниями отказов каждого элемента ТС, ИТ1, ИТ2 и сочетаниями этих состояний; ТС+ИТ1, ТС+ИТ2 и ИТ1+ИТ2. Граф, отражающий такую структуру состояний ТСС, в сокращенном виде изображен на рис. 2, б. Номера состояний на графе соответствуют отказавшим элементам (элементы 1–18

являются участками сети, элементы 19–30 соответствуют источникам). Марковский случайный процесс, удовлетворяющий заданным условиям, описывается системой из 283 стационарных линейных уравнений вида (2).

Определение уровней подачи теплоносителя потребителям в различных состояниях ТСС осуществляется на основе многовариантных расчетов потокораспределения в ТС с учетом отказов оборудования ИТ с помощью модели (15)–(17). Результаты по расчету вероятностей состояний системы и послеаварийных гидравлических режимов ввиду большого массива данных не приводятся.

Диапазоны значений оптимизируемых параметров надежности элементов ТСС заданы для интенсивности отказов,  $1/\text{ч}$ :  $0,00045 \leq \lambda_i \leq 0,0025$ ; интенсивности восстановления,  $1/\text{ч}$ :  $0,02 \leq \mu_i \leq 0,09$ . Оптимизация параметров надежности ТСС производится при условии выполнения следующих нормативных значений узловых ПН [1]:  $K_j^0 = 0,97$  и  $R_j^0 = 0,9$ .

Функции затрат на повышение надежности элементов ТСС, составляющие целевую функцию (20), получены укрупненно на основе анализа данных по составу и удельной стоимости резервных элементов ТСС, а также по созданию и содержанию АВС [1]. Анализ этих данных позволил с помощью методов аппроксимации получить необходимые зависимости затрат от параметров надежности в виде степенных функций.

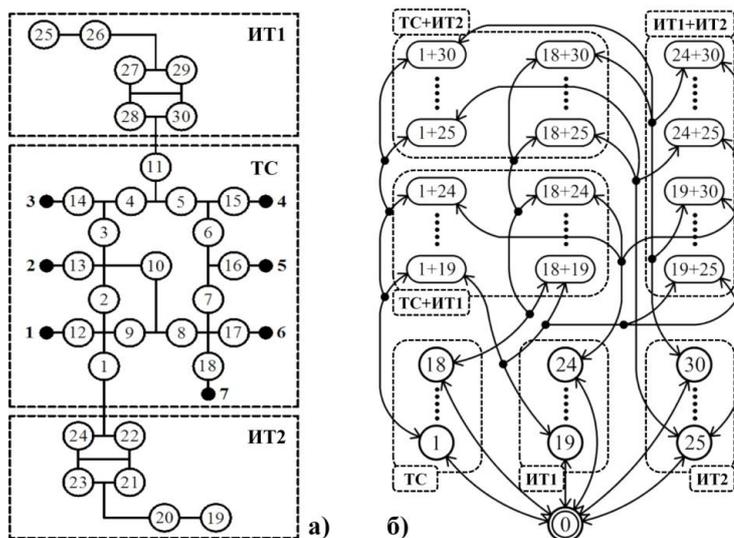


Рис. 2. Моделирование случайного процесса функционирования ТСС: а) расчетная схема системы для анализа надежности; б) граф состояний системы

На рис. 3 проиллюстрирован поиск оптимального соотношения интегральных параметров надежности элементов ТСС, соответствующих минимальным затратам на обеспечение надежности по системе при выполнении требуемых узловых ПН.

На представленной диаграмме изображены два графика: линия 1 представляет зависимость между интегральными параметрами надежности элементов, график 2 показывает изменение затрат на обеспечение требуемого уровня надежности теплоснабжения в зависимости от их соотношения. Полученное при заданных исходных условиях решение соответствует затратам на обеспечение надежности в объеме 9,18 млн. руб. (в год) при следующих значениях интегральных параметров надежности – интенсивность отказов 0,0015  $1/\text{ч}$ , интенсивность восстановления 0,06  $1/\text{ч}$ .

На рис. 4 показано разнесение значений интегральных параметров надежности по элементам схемы ТСС согласно условиям (18) и (19) в соответствии с минимальными системными затратами на обеспечение их надежности. Интенсивности отказов элементов распределены в диапазоне 0,00048–0,0023 1/ч и интенсивностей восстановлений 0,031–0,085 1/ч.

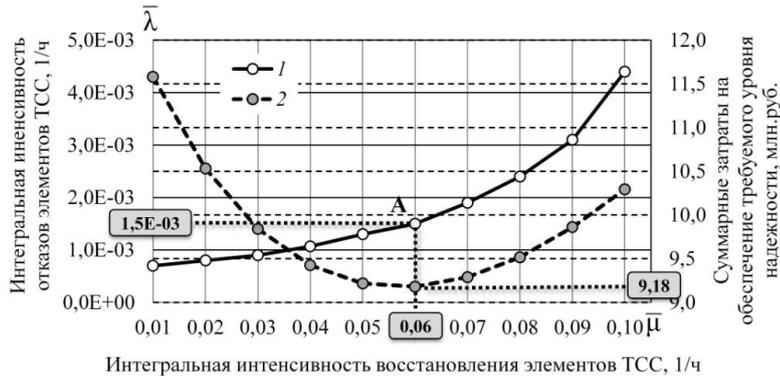


Рис. 3. Поиск оптимальных интегральных параметров надежности элементов ТСС

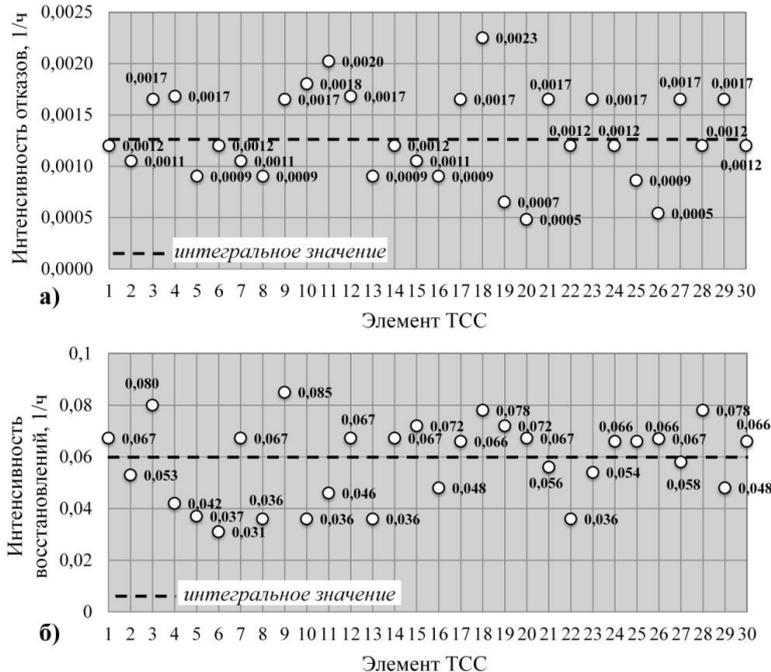


Рис. 4. Разнесение интегральных значений параметров надежности по элементам схемы ТСС:  
а) интенсивность отказов; б) интенсивность восстановлений

### Заключение

В работе предложена методика оптимизации элементной надежности ТСС в составе общей проблемы синтеза надежности ТСС. Преимущества предложенной методики, по сравнению с существующими подходами к решению данной проблемы, заключаются в следующем.

1. Совместная оптимизация надежности элементов схем ИТ и ТС позволяет наиболее рационально распределить средства на обеспечение (повышение) надежности теплоснабжения потребителей.

2. В методике объединены направления по снижению отказов и повышению восстанавливаемости элементов в единой процедуре поиска параметров надежности, что позволяет наиболее рационально распределить суммарный потенциал по повышению надежности элементов ТСС.

3. Формализованный учет ПН в качестве изначально выполняемого условия при определении интегральных параметров надежности не требует итерационных и многовариантных расчетов при оптимизации надежности, в отличие от большинства традиционных постановок подобных задач, в которых требования к ПН задаются в качестве критериев или ограничений оптимизации.

4. Совместное использование двух ПН (вероятности безотказной работы и коэффициента готовности) при определении параметров надежности элементов разрешает известный конфликт резервирования 2-го типа в ТСС [1, 12].

### **Литература**

1. Надежность систем теплоснабжения: справочник., Отв. ред. Сеннова Е.В. Новосибирск: Наука, 2000. 360 с.
2. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Под ред. Ю.Н.Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1994. 474 с.
3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.
4. Стенников В.А., Постников И.В. Комплексный анализ надежности теплоснабжения потребителей // Известия РАН. Энергетика. 2011 № 2. С. 107–121.
5. Стенников В.А., Постников И.В. Развитие методов анализа надежности теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2010, № 5–6. С. 28–40.
6. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Methods for the integrated reliability analysis of heat supply // Power Technology and Engineering. Vol. 47, No. 6, March, 2014, p. 446–453.
7. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Methodological support for a comprehensive analysis of fuel and heat supply reliability / Sustaining power resources through energy optimization and engineering, Vasant P., VoropaiN.I., editors. – Hershey PA: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2016, p. 102–126.
8. Lisnianski A., Elmakias D., HanochB.H. A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit. Reliability engineering & system safety 2012; 98: 1–6.
9. Haghifam M., Manbachi M. Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems. International journal of electrical power & energy systems 2011; 33: 385–93.
10. Gengfeng Li, ZhaohongBie, Yu Kou, Jiangfeng Jiang, MattiaBettinelli. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication. Applied Energy 2016; 167: 397–406.
11. Hyung-GeunKwag, Jin-O Kim. Reliability modeling of demand response considering uncertainty of customer behavior. AppliedEnergy 2014; 122: 24–33.
12. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск, 1985. 222 с.
13. Соколов В.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Издательство МЭИ, 1999. 472 с.
14. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.

### **Авторы публикации**

**Постников Иван Викторович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. E-mail: postnikov@isem.irk.ru.

**Стенников Валерий Алексеевич** – чл.-корр. РАН, профессор, ВРИО директора Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН. E-mail: sva@isem.irk.ru.

## References

1. Reliability of heat supply systems / Reference book, ed. SennovaE.V. Novosibirsk: Nauka, 2000. 360 p.
2. Reference book on general models of analysis and synthesis of energy system reliability / Ed. RudenkoY.N. Moscow: Energoatomizdat, 1994. 474 p.
3. Polovko A.M., GurovS.V. Fundamentals of reliability theory. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2006. 702 p.
4. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Comprehensive analysis of heat supply reliability // Izvestiya RAN. Energertika, N2, 2011. M.: Nauka, p. 107–21.
5. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Development of methods for reliability analysis of heat supply // Problemyenergetiki, N5–6, 2010. – Izd. KGEU, p. 28–40.
6. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Methods for the integrated reliability analysis of heat supply // Power Technology and Engineering. Vol. 47, No. 6, March, 2014, p. 446–453.
7. Stennikov V.A., Postnikov I.V. Methodological support for a comprehensive analysis of fuel and heat supply reliability / Sustaining power resources through energy optimization and engineering, Vasant P., VoropaiN.I., editors. – Hershey PA: Engineering Science Reference (an imprint of IGI Global), 2016, p. 102–126.
8. Lisnianski A., Elmakias D., HanochB.H. A multi-state Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit. Reliability engineering & system safety 2012; 98: 1–6.
9. Haghifam M., Manbachi M. Reliability and availability modelling of combined heat and power (CHP) systems. International journal of electrical power & energy systems 2011; 33: 385–93.
10. Gengfeng Li, ZhaohongBie, Yu Kou, Jiangfeng Jiang, MattiaBettinelli. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication. Applied Energy 2016; 167: 397–406.
11. Hyung-GeunKwag, Jin-O Kim. Reliability modeling of demand response considering uncertainty of customer behavior. AppliedEnergy 2014; 122: 24–33.
12. SennovaE.V., SidlerV.G. Mathematical modeling and optimization of expanding heat supply systems. – Novosibirsk: Nauka, 1985. – 222 p.
13. SokolovV.Y. Cogeneration and heat networks. Moscow: Publishing House of MEI, 1999. 472 p.
14. MerenkovA.P., KhasilevV.Ya. Theory of hydraulic circuits. Moscow: Nauka, 1985. 278 p.

## Authors of the publication

*Postnikov Ivan Viktorovich* – PhD, Senior Researcher, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS.

*Stennikov Valery Alexeevich* – corresponding member of RAS, professor, Melentiev Energy Systems Institute of SB RAS.

*Поступила в редакцию*

*24 января 2017г.*