

УДК 620.9

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА САМАРЫ

А.Г. Салов, Л.А. Сагитова

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Аннотация. Проведен анализ технического состояния систем теплоснабжения г. Самары и предложена модель оценки вероятности их безаварийной работы в отопительный период. Проведен анализ статистических данных о состоянии тепловых сетей г. Самары за период с 2006 по 2016 гг., который показал, что к началу 2017 года протяженность тепловых сетей, требующих замены и находящихся в эксплуатации, составляла 36,7 % от всей ее длины. Для оценки вероятности безаварийной работы системы теплоснабжения разработана математическая модель в виде степенной неоднородной функции, связывающая протяженность сетей, требующих замены и находящихся в рабочем состоянии, с вероятностью безотказной работы. Проведена идентификация параметров построенной модели и оценена корреляция расчетных значений по ней с вероятностью, посчитанной по статистическим данным. Критерии оценки качества построенной модели свидетельствуют о хорошей сходимости модельных результатов с расчетами по статистическим данным.

Ключевые слова: системный анализ, надежность работы системы теплоснабжения, математическая модель, вероятность безотказной работы.

Система теплоснабжения города Самары исторически стала преобразовываться в централизованную систему города Куйбышева, впоследствии переименованного в Самару, в начале 50-х годов прошлого века.

В сороковых годах существовали элементы системы централизованного теплоснабжения, отапливающие отдельные районы города. Одна из таких систем обеспечивала теплом центральную часть старого города от Куйбышевской государственной районной энергетической станции (ГРЭС), другая система – быстро развивающийся промышленный район Безымянку от строящейся в то время Безымянской теплоэлектроцентрали (БТЭЦ).

В дальнейшем в результате интенсивного развития промышленности Куйбышевского региона и соответственно жилищного строительства стали возникать отдельные микрорайоны и, соответственно, источники централизованного теплоснабжения. Так в конце шестидесятых годов появилась отопительная котельная в районе Центрального автовокзала, немного позднее – Самарская теплоэлектроцентраль, затем – Привокзальная отопительная котельная.

Одновременно с этим развивалась и единая система централизованного теплоснабжения, которая объединила отдельно существовавшие районные тепловые сети в единую сеть.

Переход экономики страны к рыночным отношениям, начавшийся после

Салов Алексей Георгиевич (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Теплоснабжение и вентиляция».

Сагитова Ляйсан Акзамовна, аспирантка.

1990 года, оказался сложным, долгим, и до настоящего времени переходный период еще не закончился.

Процесс реструктуризации энергетики протекал на фоне морального старения и физического износа генерирующего оборудования, систем транспорта тепловой и электрической энергии, в условиях дефицита финансирования [1].

В процессе реструктуризации произошла замена базового принципа управления энергетикой, заключавшегося в бесперебойном и надежном обеспечении потребителей тепловой и электрической энергией соответствующего качества, на принцип получения наибольшей прибыли [2], [3], [4]. Прекратилось финансирование текущего ремонта оборудования, что привело к постоянному росту тарифов на производимую энергетикой продукцию и отрицательно сказалось на деятельности промышленных предприятий, потребляющих тепловую энергию, производимую энергосистемой. В целом к 1996 году потребление и производство тепловой и электрической энергии в Самарской области снизилось на 40 %.

Еще в более худшем положении оказались тепловые сети, перешедшие в частные руки при практически полном отсутствии платежей со стороны предприятий и жилищно-коммунального хозяйства [5].

Энергосистема перешла на ремонт оборудования ТЭЦ, котельных и тепловых сетей по текущему состоянию оборудования, а не по нормативным показателям, как это было принято до 1990 г.

Сети централизованного теплоснабжения не имеют стопроцентного резервирования, а оценить реальное состояние всех участков, требующих замены, по исследованию их отдельных элементов не представляется возможным.

Общепринятым критерием эффективности работы систем централизованного снабжения является надежность обеспечения качественных показателей тепловой энергии и безотказность этого теплоснабжения.

Оценим состояния тепловых сетей указанного региона за период с 2006 по 2016 гг.

К началу 2006 года система централизованного теплоснабжения была выведена в отдельное предприятие, в задачи которого входила необходимость обеспечения бесперебойного снабжения потребителей тепловой энергии. Надежность систем теплоснабжения оцениваем по вероятности их безотказной работы (ВБР).

Минимально допустимый показатель вероятности безотказной работы для тепловых сетей следует принимать $P_{т.с.} = 0,9$, для источника теплоты $P_{и.т.} = 0,97$, для абонентских установок потребителей $P_{потр.} = 0,99$ [6]. Вероятность безотказной работы системы центрального отопления в целом должна составлять не менее $P_{с.ц.т.} = 0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,99 = 0,86$.

Проведем анализ текущего состояния системы централизованного отопления по ее техническому состоянию на основании данных Территориального органа Федеральной службы государственной статистики [7], приведенных в табл. 1.

На настоящий момент централизованная система теплоснабжения города Самары включает в себя тепловую сеть в двухтрубном исполнении длиной более 1 000 км и около 150 источников теплоснабжения. В последние десять лет происходила постоянная реструктуризация системы централизованного отопления, предусматривающая присоединение отдельных районных тепловых сетей вместе с источниками теплоснабжения к единой централизованной системе, что и обуславливало непрерывный рост источников теплоснабжения, а также увеличение

числа источников теплоснабжения с единичной мощностью более 3 Гкал/ч, что является весьма положительным фактором.

Таблица 1

**Статистические данные по протяженности и состоянию тепловых сетей
в г.о. Самара**

Показатель	Число источников теплоснабжения	Число источников теплоснабжения мощностью до 3 Гкал/ч	Протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении	Протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене	Протяженность тепловых и паровых сетей, которые были заменены и отремонтированы за отчетный год	
Ед. изм.	единица	единица	метр	метр	метр	
Рассматриваемый период	2006	120	61	708800	306100	23700
	2007	120	61	708800	306100	22998
	2008	115	56	708759	306107	27939
	2009	122	64	731600	303650	26054
	2010	121	56	731600	303650	22197
	2011	121	52	888325	220658	23227
	2012	120	52	910181	223304	17038
	2013	118	52	910181	394980	14587
	2014	115	45	910181	285925	14872
	2015	137	48	919300	394300	13600
	2016	146	44	1075100	394980	15100

Это обстоятельство может быть объяснено тем, что в новых экономических условиях отопительные котельные, находящиеся в пределах административного округа, оказываются нерентабельными из-за недостатка финансирования, приходят в ветхое состояние и прекращают свою деятельность, а тепловые сети, принадлежащие им, переходят в ведение городских тепловых сетей.

Эта тенденция подтверждается значительным ростом протяженности тепловых сетей городского округа Самара и, естественно, увеличением длины сетей, требующих замены, поскольку при ликвидации собственника все оборудование, в том числе и тепловые сети, передаются в техническом состоянии их на этот момент.

Динамика протяженности тепловых сетей и их состояния за период с 2006 по 2016 гг. приведена на рис. 1.

В конце 2006 г. тепловые сети города имели в своем составе 57 % тепловых

сетей, не выработавших свой ресурс, и, соответственно, 43 % сетей, требующих замены.

В 2011, 2012 и 2014 гг. происходило резкое снижение протяженности тепловых сетей, требующих замены, без роста объема ремонтных работ. Вероятно, данное снижение связано с апробированием новых методик оценки состояния тепловых сетей.

К концу 2016 г. протяженность тепловых сетей составляла 1075,1 км, при этом в замене нуждалось 395 км, что на 88,9 км больше, чем в 2006 г. Это означает, что 36,7 % тепловых сетей выработало свой срок службы, и свидетельствует о значительной вероятности аварийных остановов отдельных участков тепловой сети.

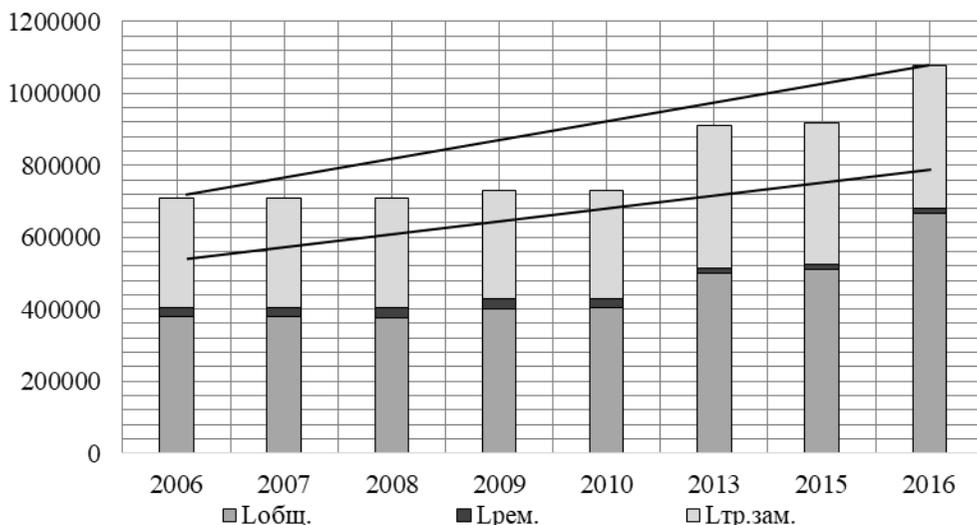


Рис. 1. Данные о протяженности и состоянии тепловых сетей с 2006 по 2016 гг.:

$L_{общ.}$ – протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, м; $L_{тр.зам.}$ – протяженность тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене, м; $L_{рем.}$ – протяженность тепловых и паровых сетей, которые были заменены и отремонтированы за отчетный год, м

Статистические данные, приведенные на рис. 1, характеризуют динамику состояния тепловых сетей по годам в предположении постоянства в течение года протяженности тепловых и паровых сетей в двухтрубном исчислении, нуждающихся в замене.

Сеть централизованного теплоснабжения является сложной технической системой, состоящей из нескольких тысяч однотипных элементов, а именно – трубопроводов, запорной арматуры, компенсаторов и т. д. различных диаметров.

Используя методологию системного анализа сложных производственных систем [8], построим математическую модель, позволяющую оценить надежность работы тепловых сетей города Самары.

Отказами в работе тепловой сети, как правило, являются повышенные потери теплоносителя тепловой сети за счет нарушения нормальной работы запорных устройств или появления утечек в трубопроводах, повлекших прекращение по-

дачи тепловой энергии потребителям. Восстановление тепловой сети осуществляется путем замены вышедшей из строя арматуры или разрушенных участков трубопроводов. Срок эксплуатации тепловой сети значительно превышает период устранения отказов, а поведение отремонтированной сети не зависит от событий, происходивших во время отказов. Таким образом, поток отказов не обладает последствием и условия появления событий во взаимно не пересекающихся интервалах времени независимы [9].

Поток отказов тепловой сети также обладает свойством ординарности, которое свидетельствует о том, что вероятность появления более одного события на интервале Δt пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью появления на этом интервале ровно одного события [9].

При приближенном определении вероятности безотказной работы тепловой сети в течение года можно принять, что поток отказов обладает стационарностью, при этом параметр потока отказов ω можно положить независимым от времени [10]. Такое допущение справедливо, поскольку интервал времени, в течение которого анализируется надежность работы сети (один год), является сравнительно малым по сравнению со временем эксплуатации сети, которое составляет не менее 30 лет [6]. Таким образом, поток отказов тепловой сети обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последствий и его можно считать простейшим.

Тогда вероятность появления отказов будет подчиняться закону Пуассона [11]:

$$P_{m(t)} = \frac{(\omega t)^m}{m!} e^{-\omega t}, \quad (1)$$

где m – количество отказов за время t ;

t – рассматриваемый период эксплуатации, для нашего случая примем $t = 1$ год;

ω – параметр потока отказов тепловой сети.

Вероятность того, что в течение года на тепловой сети не произойдет ни одного отказа, будем оценивать по соотношению

$$P_{m.c.} = e^{-\omega \cdot t}. \quad (2)$$

Параметр потока отказов оценивается по формуле

$$\omega = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{N \cdot \Delta t}. \quad (3)$$

В соотношении (3) m_i – количество отказов каждого из N объектов за время Δt .

Одним объектом тепловой сети будем считать участок между двумя соседними секционными задвижками, а также одну из присоединенных к нему задвижек. Тогда для двухтрубной системы теплоснабжения количество участков тепловой сети составит

$$N = 2(2n + 1), \text{ ед.,}$$

где n – количество участков тепловой сети.

Согласно [6] максимальное расстояние между двумя соседними задвижками составляет для $D_u \leq 100 \text{ мм} - 1000 \text{ м}$, $400-500 \text{ мм} - 1500 \text{ м}$, для $D_u \geq 600 \text{ мм} -$

3000 м. В первом приближении примем среднее значение длины одной секции $l_{секц.}$ равным 1500 м. Тогда

$$n = \frac{L_{общ.}}{l_{секц.}}. \quad (4)$$

Количество отказов находим аналогичным образом, принимая, что на трубах, требующих замены, в течение года произойдет отказ, а вероятность того, что любой из N элементов откажет за время Δt более 1 раза, равна 0. Тогда

$$\sum_{i=1}^n m_i = 2 \cdot m + 2 \cdot (m + 1), \quad (5)$$

где

$$m = \frac{L_{тр.зам.}}{l_{секц.}}. \quad (6)$$

Используя статистические данные, оценим вероятность безотказной работы тепловой сети за весь рассматриваемый период с помощью формул (2)–(6).

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчет ВБР тепловых сетей

Показатель	Ед. изм.	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
n – количество секций	шт.	473	473	473	488	488	592	607	607	607	613	717
N – число элементов	шт.	1892	1892	1892	1953	1953	2371	2429	2429	2429	2453	2869
m – число секций, требующих замены	шт.	204	204	204	202	202	147	149	263	191	263	263
$\sum_{i=1}^n m_i$ – количество отказов	шт.	818	818	818	812	812	590	597	1055	764	1053	1055
ω – параметр потока отказов тепловой сети		0,432	0,432	0,432	0,416	0,416	0,249	0,246	0,434	0,315	0,429	0,368
$P_{т.с.}$ – ВБР тепловой сети		0,649	0,649	0,649	0,660	0,660	0,780	0,782	0,648	0,730	0,651	0,692

Анализ расчетных данных, приведенных в таблице, показывает, что вероятность безотказной работы тепловых сетей за период с 2006 по 2016 гг. колеблет-

ся в пределах от 0,648 до 0,78, ее величина далека от требуемых значений и не удовлетворяет требованиям СП «Тепловые сети» [6].

С целью прогнозирования состояния тепловой сети и вероятности ее безотказной работы построим математическую модель, связывающую протяженность исправных и требующих замены тепловых сетей с вероятностью безотказной работы в виде двухфакторной неоднородной производственной функции Кобба – Дугласа [12] в виде

$$P_{m.c.} = A \cdot L_{испр.}^{\alpha} \cdot L_{тр.зам.}^{\beta}, \quad (7)$$

где $P_{m.c.}$ – вероятность безотказной работы тепловых сетей;

$L_{испр.} = L_{общ.} - L_{тр.зам.}$ – протяженность исправных тепловых сетей, м;

$L_{тр.зам.}$ – протяженность тепловых сетей, нуждающихся в замене, м;

α, β – коэффициенты эластичности;

A – масштабный параметр.

Идентификация параметров модели A, α, β проведена для сглаженных исходных статистических данных, что позволит устранить влияние их случайных отклонений.

Эластичности α и β являются логарифмическими функциями чувствительности, характеризующими относительный вклад протяженности исправных тепловых сетей и тепловых сетей, нуждающихся в замене, в вероятность безотказной работы тепловых сетей.

Результаты моделирования приведены в табл. 3.

Адекватность построенной модели статистическим данным была оценена с помощью: t -критерия Стьюдента, определяющего значимость параметров модели, коэффициента детерминации R^2 , среднеквадратичного отклонения σ и критерия Дарбина – Уотсона DW , определяющего прогнозные свойства модели.

Коэффициент детерминации R^2 равен 0,997, что говорит о достаточно высоком качестве модели. Погрешности оценки расчетов составляют менее 1%. F -критерий Фишера равен 1451,7, поэтому вероятность того, что полученные результаты случайны, крайне низка.

На рис. 2 приведено сопоставление результатов моделирования по формуле (6) с расчетными данными, приведенными в табл. 2.

В целом построенная модель дает результаты, близкие к расчетным значениям по статистическим данным. Идентифицированные коэффициенты эластичности позволяют оценить, как изменится надежность теплоснабжения при снижении протяженности неисправных тепловых сетей.

Таблица 3

Двухфакторная производственная функция Кобба – Дугласа

Параметры модели и коэффициенты	A	α	β	DW	R^2	t_A	t_α	t_β	F	σ
Значения параметров	0,512	0,234	-0,221	1,715	0,997	-6,651	48,53	-31,235	1451,7	0,002907

Так, если протяженность тепловых сетей, требующих замены, снизится на 1 %, то при $\beta = -0,221$ вероятность безотказной работы тепловой сети возрастет на 0,221 %. При увеличении протяженности исправных тепловых сетей на 1 % $\alpha = -0,234$ вероятность безотказной работы увеличится на 0,234 %.

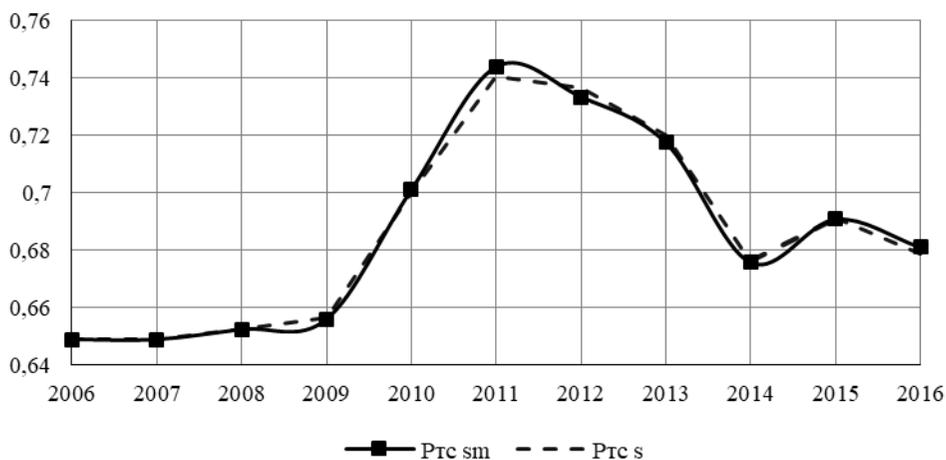


Рис. 2. Вероятность безотказной работы тепловой сети:
 $P_{tc\ s}$ – сглаженная вероятность безотказной работы тепловой сети;
 $P_{tc\ sm}$ – ВБР тепловой сети по модели однородной производственной функции
 Кобба – Дугласа

Таким образом, данные результатов моделирования позволяют получить количественную оценку влияния состояния тепловых сетей на надежность работы системы теплоснабжения. Существенным преимуществом построенной модели является то, что она упрощает проведение расчетов, позволяет проводить прогнозные оценки надежности работы тепловой сети при наличии ограниченного объема статистических данных о техническом состоянии системы.

Анализ результатов эксплуатации тепловой сети города в последние годы показывает, что в среднем происходят 1–2 аварии в неделю по данным информационных систем, требующие отключения или ограничения теплоснабжения потребителей. Проводимые аварийные ремонты при этих авариях не повышают, а снижают надежность сетей, которые требуют замены. Это объясняется тем, что ликвидируется авария, то есть латаются пришедшие в негодность системы, а не заменяются участки – от запорного до запорного органа, как это происходит при капитальных ремонтах.

Заключение

Проведенный в статье анализ состояния, надежности работы и условий эксплуатации централизованной системы отопления города Самара позволяет сделать следующие выводы:

1. Величина показателя вероятности безотказной работы тепловых сетей свидетельствует о том, что эксплуатация в таком состоянии тепловой сети противоречит нормативным показателям, в частности требованиям СП «Тепловые сети» [6].

2. Поскольку компания находится в частных руках, то администрации города необходимо принять меры, стимулирующие собственников производить заме-

ну тепловых сетей, нуждающихся в ней, а не осуществлять аварийные ремонтные работы в отопительный период, которые в целом не повышают надежности работы сети.

3. Администрации города предлагается разработать мероприятия, стимулирующие собственников тепловых сетей вкладывать средства в повышение надежности их работы.

Предлагается как один из возможных вариантов обязать собственников тепловых сетей при проведении ремонтных работ в отопительный период выплачивать отключенным потребителям компенсацию за использование электрической энергии на нужды отопления при несоответствии качественных показателей энергоносителя (снижение температуры воды в подающем трубопроводе, расходов теплоносителя, отключение горячей воды и т. д.) расчетным значениям. Компенсация должна выплачиваться по существующим на момент аварии тарифам за потребленную электрическую энергию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Салов А.Г.* Системная методология анализа энергоэффективности территориальной генерирующей компании в условиях перехода к рыночным отношениям: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук / Самара: Самарский государственный технический университет. 2009. – 42 с. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15951359> (дата обращения 14.09.2018).
2. *Дилigenский Н.В., Шелудько Л.П.* Проблемы и пути реализации региональной энергосберегающей политики // Вестник Самарского технического университета. – 1998. – Вып. 5. – С. 144–151.
3. *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Иванова Д.В.* Исследование экономических характеристик регионального промышленного комплекса методами статического и модельного анализа // Научное обозрение. – 2015. – № 15. – С. 327–332.
4. *Салов А.Г., Гаврилова А.А., Князев П.А., Круглов В.А.* Имитационное моделирование деятельности генерирующего комплекса на основе трехфакторной производственной функции // Вестник СГАСУ Строительство и архитектура: научно-технический журнал. – 2016. – № 3. – С. 140–145.
5. *Дилigenский Н.В., Цапенко М.В.* Математическое моделирование и обобщенное оценивание эффективности производственно-экономических систем // Труды VI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: СНЦ РАН, 2004. – С. 96–106.
6. СП 124.13330.2012. Тепловые сети: свод правил: утв. МинРегионом России 30.06.2012: взамен СНиП 41-02-2003: срок введения в действие 01.01.2013 / МинРегион России. – Изд. офиц. – М.: МинРегион России, 2012. – 73 с.
7. Жилищное хозяйство и бытовое обслуживание населения в России // Сборник Росстат. http://samarastat.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_ts/samarastat/ru/municipal_statistics/main_indicators/ (дата обращения 14.10.2018).
8. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Основы теории систем и системного анализа. – СПб: Изд-во СПбГТУ, 2004. – 520 с.
9. *Дорохов А.Н., Керножицкий В.А., Миронов А.Н., Шестопалова О.Л.* Обеспечение надежности сложных технических систем: Учебник. – СПб.: Лань, 2011. – 352 с.
10. *Руденко Ю.Н., Ушаков И.А.* Надежность систем энергетики. 2-е изд., перераб. и доп. – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1989. – 328 с.
11. *Балакирев В.С.* Надежность систем автоматизации: учеб. пособие. 2-е изд., испр. – Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2006. – 146 с.
12. *Дилigenский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Построение и идентификация математических моделей производственных систем: Учеб. пособие. – Самара: Офорт, 2006. – 126 с.

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2018 г.

SYSTEM ANALYSIS OF RELIABILITY OF DISTRICT HEAT SUPPLY IN SAMARA

A.G. Salov, L.A. Sagitova

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. *The paper analyzes the technical conditions of heat supply systems in Samara city. A model for estimating the status of probability of no-failure during the heating season was proposed. The analysis of the technical conditions of the Samara city's heating networks from 2006 to 2016 was carried on. Analysis revealed that by the beginning of 2017 the length of the heating networks in service and identified for replacement was indicating as 36,7% from entire length of the heating networks. A mathematical model as exponentiation not uniform function for the assessment of the probability of the trouble-free operation of the heat supply system was developed. The model constructed attributes the length of the networks identified for replacement and the length of the networks maintained in good working order to the probability of the trouble-free operation. The parameters of the constructed mathematical model were identified. The correlation of calculated values with probability calculated from statistical data was evaluated. Quality assessment criteria for the constructed model attest to a good convergence of model results with calculations based on statistical data.*

Keywords: *system analysis, operating reliability of heat supply system, mathematical model, probability of no-failure.*

REFERENCES

1. *Salov A.G.* Sistemnaya metodologiya analiza ehnergoeffektivnosti territorial'noj generiruyushchej kompanii v usloviyah perekhoda k rynochnym otnosheniyam – Avtoferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni doktora tekhnicheskikh nauk // Samara, SamGTU, 2009. 42 pp. (In Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=15951359>
2. *Diligenskij N.V., SHelud'ko L.P.* Problems and ways to implement regional energy-saving policies // Vestnik Samarskogo tekhnicheskogo universiteta. 1998, no. 5. Pp. 144–151 (In Russian).
3. *Salov A.G., Gavrilova A.A., Ivanova D.V.* Research of economic characteristics of regional industrial complex by methods of static and model analysis // Nauchnoe obozrenie. 2015. № 15. Pp. 327–332 (In Russian).
4. *Salov A.G., Gavrilova A.A., Knyazev P.A., Kruglov V.A.* Simulation modeling of generating complex activity on the basis of three-factor production function // Vestnik SGASU Stroitel'stvo i arhitektura: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. 2016. № 3. Pp. 140–145 (In Russian).
5. *Diligenskij N.V., Capenko M.V.* Mathematical modeling and generalized estimation of efficiency of production and economic systems // Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Samara, SNC RAN, 2004. P. 96–106 (In Russian).
6. SP 124.13330.2012. Thermal networks: svod pravil: utv. MinRegionom Rossii 30.06.2012: vzamen SNiP 41-02-2003: srok vved. v d. 01.01.2013 / MinRegion Rossii. – Izd. ofic. – Moskva: MinRegion Rossii, 2012. 73 p.
7. ZHilishchnoe hozyajstvo i bytovoe obsluzhivanie naseleniya v Rossii [Housing and consumer services in Russia] // Sbornik Rosstat. – www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1138887300516 (accessed September 5, 2018).
8. *Volkova V.N., Denisov A.A.* Osnovy teorii sistem i sistemnogo analiza [Fundamentals of systems theory and system analysis]. St. Petersburg, Izdatel'stvo SPbGTU. 2004. 520 pp. (In Russian).
9. *Dorohov A.N., Kernozhickij V.A., Mironov A.N., Shestopalova O.L.* Obespechenie nadyozhnosti slozhnyh tekhnicheskikh sistem: Uchebnik [Ensuring the reliability of complex technical systems: Textbook]. Saint-Petersburg, Izdatel'stvo «Lan'», 2011. 352 p. (In Russian).

10. *Rudenko Yu.N., Ushakov I.A.* Nadyozhnost' sistem ehnergetiki. 2-e izd., pererab. i dop. [reliability of energy systems. 2nd edition., revised and expanded]. Novosibirsk, Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1989. 328 p.
11. *Balakirev V.S.* Nadyozhnost' sistem avtomatizacii: uchebnoe posobie. 2-e izd., ispr.[Reliability of automation systems: tutorial. 2nd edition, revised]. Saratov, Saratov state technical university, 2006. 146 p.
12. *Diligenskij N.V., Gavrilova A.A., Capenko M.B.* Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennyh sistem: Uchebnoe posobie [Construction and identification of mathematical models of production systems: Tutorial]. Samara, OOO «Ofort», 2005. 126 pp. (In Russian).