

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского
Кафедра энергообеспечения и теплотехники

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие по дисциплине «Надежность, живучесть
и безопасность теплоэнергетических систем»
для студентов высших аграрных учебных заведений,
обучающихся в магистратуре по направлению подготовки
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Молодежный 2021

УДК 697.039

Печатается по решению методического совета энергетического факультета Иркутского ГАУ (протокол № 5 от 19 января 2021 г.).

Рецензент: заведующий кафедрой технического сервиса и общинженерных дисциплин Иркутского ГАУ, доктор технических наук, профессор Бураев М.К.

Буйнов Н.Е. Надежность систем теплоснабжения: учеб. пособие / Н.Е. Буйнов, В.А. Бочкарев, В.Д. Очиров; Иркут. гос. агр. ун-т им. А. А. Ежевского. – Молодежный: Изд-во Иркутского ГАУ, 2021. – 67 с. – Текст : электронный.

Излагается материал лекций по дисциплине «Надежность, живучесть и безопасность теплоэнергетических систем». Рассмотрены элементы теории вероятностей и статистики, применяемые в теории надежности, приведены результаты статистической обработки показателей надежности оборудования систем теплоснабжения. Значительное внимание уделено методам расчета показателей надежности систем теплоснабжения с примерами расчета кольцевых и тупиковых трубопроводных систем. Приведены вопросы для самоконтроля.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника.

© Н.Е. Буйнов, В.А. Бочкарев, В.Д. Очиров, 2021.
© Иркутский ГАУ им. А.А. Ежевского, 2021.

ВВЕДЕНИЕ

Цель учебного пособия – познакомить студентов с методами и математическими моделями анализа и синтеза систем теплоснабжения.

Исследования по надежности теплоснабжающих систем с использованием методов теорий вероятностей, статистики и надежности начали развиваться в конце 60-х – начале 70-х годов. Первоначально основное внимание уделялось улучшению качества элементов и конструкций. Тенденция развития крупных систем теплоснабжения и снижения их надежности в целом заставило обратиться к вопросам резервирования тепловых систем.

Основные методы оценки надежности систем теплоснабжения предложены и осуществлены в Московском инженерно-строительном институте (МИСИ), где надежность тепловых сетей оценивалась интегральным показателем.

Общие принципы расчета надежности и резервирования теплоснабжающих систем, базирующиеся на оценке узловых показателей, были сформулированы В.Я. Хасилевым. Эти подходы получили широкое развитие в работах Сибирского энергетического института (ныне Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева) и ВНИПИЭнергопрома.

1 Основные понятия. Исходные положения расчета надежности теплоснабжающих систем

1.1 Особенности теплоснабжающих систем (ТСС)

ТСС обладают рядом особенностей, связанных с их функциональным назначением, свойствами тепловых нагрузок, протекающих в ТСС процессов, а также с историей их развития:

1. ТСС – многофункциональные системы с разнородной тепловой нагрузкой, которые отличаются необходимым температурным потенциалом и требованиями к надежности их обеспечения. Существенно, что нарушение подачи теплоты для отопления и вентиляции может привести к катастрофическим последствиям, а для нагрузки горячего водоснабжения – лишь к снижению комфорта. Необходимо учитывать также категорию потребителей.

2. Назначение ТСС, состоящее в надежном обеспечении населения и объектов народного хозяйства страны тепловой энергией с учетом воздействия на окружающую среду и опасности для здоровья и жизни людей, определяет их большую социальную значимость. Последнее связано со снижением температуры воздуха внутри здания, с угрозой контакта с высокотемпературным теплоносителем при аварийных ситуациях.

3. В отличие от других трубопроводных транспортных систем ТСС должны обеспечивать часовую и суточную подачу тепловой энергии. Компенсация недоотпуска теплоты в более длительных интервалах времени не имеет смысла.

4. В ТСС используются различные виды резервирования, в том числе временное.

5. Оценка величины ущерба от недоотпуска теплоты затруднительна, поэтому при оптимальном синтезе принимается нормативный учет требований надежности.

6. Существенную сложность в исследовании и расчете надежности ТСС вносят тепловые сети (ТС) с нелинейными гидравлическими характеристиками элементов.

7. Нелинейность и гидравлическая связанность элементов ТС, а также многоконтурность ограничивают возможность эквивалентирования расчетных схем, усложняют зависимость расходов на участках сети и у потребителей от различных режимов и от их месторасположения в сети.

8. Существует принципиальная недостаточность статистической информации об отказах элементов ТС и законах распределения случайных величин, то есть проявляются свойства неполноты информации. Основными причинами данного положения являются индивидуальность каждой ТСС, неоднозначность параметров прокладки и условий эксплуатации, малая доступность для контроля элементов ТС.

9. Затруднительно обнаружение места аварий в ТС, что увеличивает время восстановления.

10. ТСС являются относительно локальными системами, но это территориально распределенные системы, снабжающие тепловой энергией множество

разнородных потребителей, рассредоточенных на значительной территории с пересеченным рельефом местности.

11. Для ТСС характерны частичные отказы и незначительная вероятность полного отказа.

12. Сложность структуры – особенность ТСС, приобретенная в процессе развития, она заключается в многоконтурности, разветвленности и пространственности при большом числе сооружаемых в ТС насосных станций, регулирующих устройств и объединении нескольких источников теплоты (ИТ) для работы на общие ТС.

13. ТСС – непрерывно развивающиеся системы, обусловленные ростом тепловых нагрузок, старением и обновлением элементов систем и научно-техническим прогрессом.

14. Надежность ТСС во многом зависит от внешних связей с другими системами энергетики и системами водоснабжения.

15. Участие людей в управлении развитием и функционированием превращает ТСС в сложные человеко-машинные системы, и вызывает необходимость учета данного фактора при оценке возможностей и ошибок персонала.

1.2 Основные свойства крупных ТСС

Свойства любых систем во многом определяют методы проведения анализа и синтеза надежности этих систем, применение математического аппарата и общей методологии исследования.

Рассмотрим основные свойства ТСС:

1. *Свойство целостности системы*, то есть формирование ее в качестве единого «организма» из множества разнородных, но взаимосвязанных подсистем и элементов обуславливает необходимость рассмотрения системы в целом.

2. *Свойство автономности подсистем*, определяющее иерархичность структуры системы.

3. *Свойства динамичности и инерционности* связаны с развитием системы. *Динамичность* – свойство системы изменять во времени структуру, параметры и процессы. *Инерционность* – способность системы противостоять внешним и внутренним воздействиям.

4. *Свойство неполноты информации* определяется непрерывным развитием системы в меняющихся условиях, деятельностью людей. Природа неопределенности лежит в неоднозначности прогнозов о тепловых нагрузках, в изменчивости экономических и технических показателей, в изменении качества топлива на ИТ и т.п. Существенную долю вносят неопределенность информации о показателях надежности элементов ТСС и неполнота информации о параметрах текущего состояния элементов и систем в целом.

5. *Экономичность и надежность* – основные свойства, обеспечение которых составляет одну из главных задач оптимального синтеза ТСС.

Таким образом, с точки зрения исследований надежности ТСС являются восстанавливаемыми, многоцелевыми, сложными человеко-машинными систе-

мами, имеющими внешние связи и снабжающими тепловой энергией разнородных потребителей, которые рассредоточены на большой территории.

Следует отметить еще одну особенность ТСС – периодичность или сезонность работы. ТСС проектируются на 25-30 лет эксплуатации, а основную нагрузку элементы несут в отопительный период, то есть часть года. В период простоя, когда нет высоких температур и давления, возможна повышенная стояночная коррозия.

1.3 Надежность и ее свойства

Надежность – комплексное свойство системы бесперебойно снабжать потребителей теплотой в необходимом количестве и требуемого качества, не допуская ситуаций, опасных для людей и окружающей среды. Необходимое количество означает удовлетворение графиков потребления в пределах расчетных значений расходов теплоты, на основе которых выбирались структура и параметры системы. Поэтому неудовлетворение спроса при температурах наружного воздуха ниже расчетной, подключение дополнительных потребителей, а так же увеличение неравномерности графика нагрузки на ГВС против расчетного представляет собой не следствие ненадежности ТСС, а проявление ее технического несовершенства.

В зависимости от уровня и конкретного содержания решаемых задач надежность ТСС может характеризоваться различными единичными свойствами.

Режимная управляемость ТСС – свойство системы поддерживать или переходить в требуемый режим посредством управления.

Устойчивоспособность ТСС – свойство системы сохранять гидравлическую устойчивость в течение заданного периода времени.

Живучесть ТСС – свойство противостоять возмущениям без таких отклонений параметров теплоносителя от допустимых границ, которые приводят к массовому разрушению элементов или массовому отключению потребителей.

1.4 Состояния и события, характеризующие надежность ТСС

Состояние – характеристика ТСС в определенный момент времени.

Событие – переход из одного состояния в другое.

Классификация состояний ТСС и элементов ТСС представлены на рисунках 1.1. и 1.2.

Для ТСС характерны частичные отказы, поэтому наряду с полностью работоспособным состоянием они могут находиться в частично работоспособном состоянии, когда системы не способна выполнять в полном объеме хотя бы одну из заданных функций.

Уровень работоспособности ТСС определяется перечнем и объемом функций, которые она способна выполнять на данном уровне. Поэтому различают располагаемую и рабочую мощности ТСС.

Располагаемая мощность – максимально возможная мощность, которую может развивать система в полностью работоспособном состоянии.

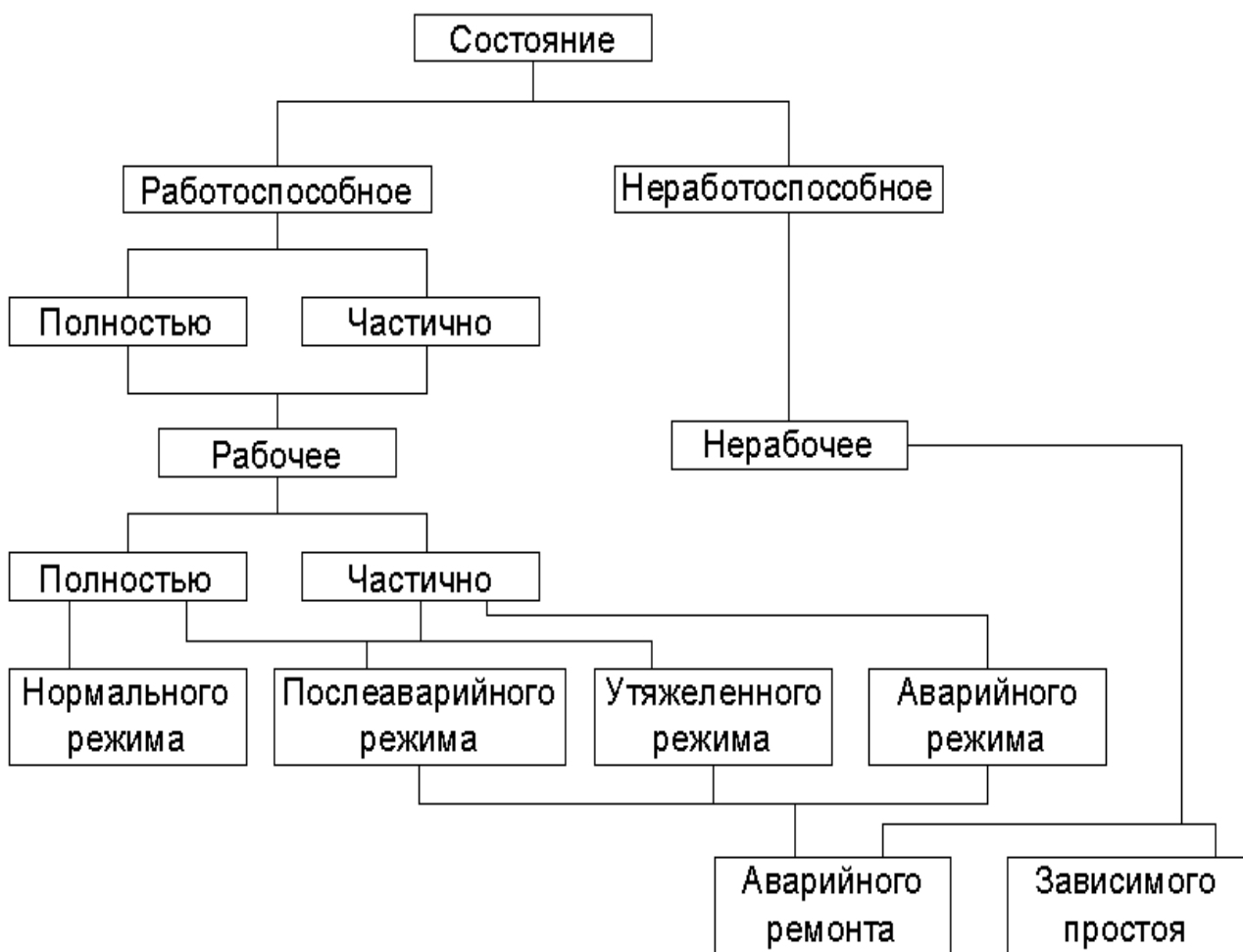


Рисунок 1.1 – Классификация состояний ТСС

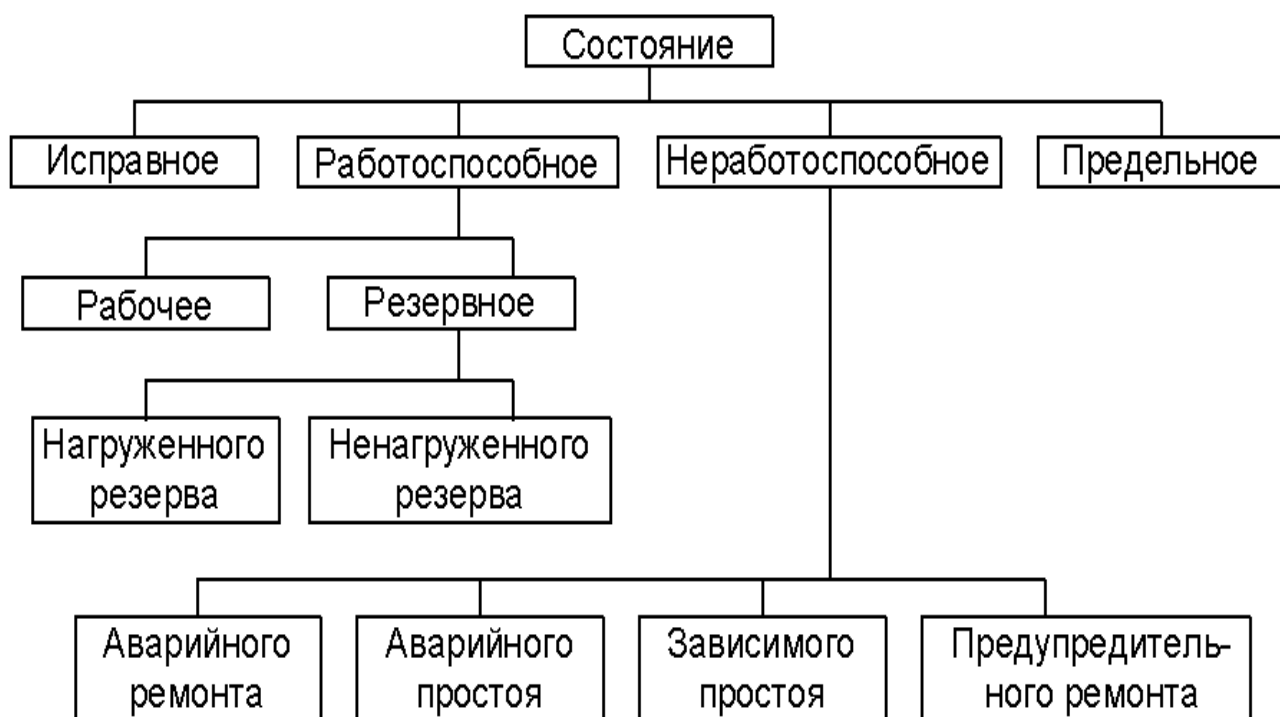


Рисунок 1.2 – Классификация состояний элементов ТСС

Рабочая мощность – мощность, развиваемая в частично работоспособных состояниях системы, определяемых состоянием элементов на данный момент.

Степень выполнения заданных системе функций зависит не только от состояния ее элементов, но и от уровня фактического спроса на тепловую энергию. Система, находящаяся в частично работоспособном состоянии, может полностью удовлетворять спрос потребителей, то есть ТСС может находиться в полностью рабочем состоянии при частичной ее работоспособности.

Существенно, что рабочему состоянию ТСС могут соответствовать различные режимы работы: нормальный, аварийный, послеаварийный, утяжеленный, ремонтный.

Нормальный режим соответствует полностью рабочему состоянию ТСС, при котором обеспечиваются расходы, температуры и давления теплоносителей на всех участках ТСС, включая потребителей.

Аварийный режим – частично рабочее или нерабочее состояние ТСС, в котором она находится от момента возникновения отказа элементов системы до его локализации или устранения.

Послеаварийный режим – полностью или частично рабочее состояние ТСС, в котором она находится после локализации отказа до установления нормального режима.

Утяжеленный режим работы в разных источниках рассматривается как разные состояния систем и элементов. По одному определению утяжеленный режим учитывается только для резервных элементов, когда показатели надежности этих элементов во время нахождения в резерве оцениваются как при рабочем состоянии, то есть они могут отказать, находясь в резерве.

По другим источникам утяжеленный режим соответствует состоянию систем, когда нет резерва или избыточности. Для ТСС утяжеленным режимом можно считать состояние, когда параметры теплоносителя (хотя бы один) превышают расчетные значения при номинальной нагрузке.

Переход ТСС из одного состояния в другое происходит в результате:

- отказов работоспособности системы;
- отказов функционирования системы;
- локализации отказов функционирования и восстановления.

Отказы системы вызываются:

- отказами элементов;
- ошибками эксплуатационного персонала;
- снижением обеспеченности системы первичными ресурсами (топливо, вода, электроснабжение и др.)

Отказы работоспособности или *функционирования* – события, приводящие к более низкому уровню работоспособности или функционирования ТСС, соответственно.

В практике эксплуатации ТСС различают аварии и отказы. Основное их различие в масштабах снижения мощности и количестве отключенных потребителей тепловой энергии. В разных системах при управлении ТСС эти разли-

чия определены и распознаются по уровню снижения теплоснабжения. Обычно отказы на транзитных и магистральных теплопроводах относят к авариям, а в распределительных и внутриквартальных сетях – к отказам или неисправностям. Различают также неразрушающие и разрушающие поглощающие отказы. В первом случае отказы элементов вызывают лишь задержку выполнения заданных функций, а во втором – результаты предыдущей работы системы разрушаются частично или полностью.

Относительно элементов отказы подразделяются на внезапные и постепенные. Внезапные отказы происходят в случайное непредсказуемое время. Постепенные отказы характерны продолжающимся снижением своих характеристик и функций, которые приводят к отказу. Постепенные отказы в принципе можно отследить.

Одним из основных способов обеспечения требуемого уровня надежности является резервирование.

Структурное резервирование – введение избыточных элементов в структуру (схему) объекта. Резервные элементы могут находиться в нагруженном или ненагруженном состоянии.

Временное резервирование – использование избыточного времени, выделяемого для выполнения поставленной перед системой задачи. В ТСС реализуется созданием запасов топлива, воды на источнике теплоты, а также аккумулирующей способностью зданий и тепловых сетей.

Нагрузочное резервирование – способность элементов воспринимать нагрузку сверх номинальных (запасы производительности, мощности, пропускной способности ТС).

Функциональное резервирование – использование способности элементов (схем) выполнять дополнительные функции вместо основных (включение обводных линий, работа подпиточных насосов вместо сетевых и т.п.).

Видов резервирования в энергетических системах, включая ТСС, довольно много, некоторые применительно к ТСС рассмотрим конкретно в ходе изучения дисциплины.

Контрольные вопросы

1. Особенности теплоснабжающих систем.
2. Основные свойства ТСС.
3. Классификация состояний ТСС.
4. Режимы работы ТСС.
5. Виды резервирования, применяемые в ТСС.

2 Показатели надежности элементов и систем

Понятие «элемент» и «система» относительны и их конкретное содержание зависит от решаемой задачи.

В теории надежности технических систем восстанавливаемым (невосстанавливаемым) считается объект, работоспособность которого в случае возникновения отказа подлежит (не подлежит) восстановлению в рассматриваемых условиях.

ТСС в общем случае рассматривается как восстанавливаемый объект, но по отношению к условиям функционирования с полным снижением подачи тепловой энергии ТСС может рассматриваться как невосстанавливаемая (размораживание трубопроводов, разрушение системы потребителей).

Наработка до отказа (между отказами) – случайная продолжительность работы до первого отказа (между отказами).

Время восстановления – длительность от момента начала восстановительных работ до момента восстановления требуемых уровней работоспособности или функционирования.

2.1 Показатели надежности элементов

Процесс эксплуатации элемента ТСС можно представить последовательностью интервалов работоспособности ξ_i и простоя η_i : $\xi_1, \eta_1, \xi_2, \eta_2$. Принимается, что величины ξ_i и η_i взаимно независимы, а распределение каждой из них не зависит от последовательности номера i .

Единичные показатели надежности (ПН) элементов:

Вероятность безотказной работы в интервале времени от 0 до t_0 – вероятность того, что случайная наработка до отказа окажется больше заданного времени работы t_0 или вероятность того, что за время t_0 не возникает отказа:

$$P(t_0) = P\{\xi_1 > t_0\} = 1 - F_1(t_0), \quad (2.1)$$

где $F_1(t_0)$ – функция распределения времени до первого отказа (наработки).

Вероятность отказа в интервале времени от 0 до t_0 – вероятность того, что за время t_0 возникнет отказ

$$Q(t_0) = P\{\xi_1 < t_0\} = F_1(t_0) = 1 - P(t_0).$$

Вероятность безотказной работы в интервале времени от t до $t + t_0$ – условная вероятность, что случайная величина ξ_i окажется больше величины $t + t_0$, если элемент уже проработал безотказно до момента времени t , или вероятность того, что элемент проработает безотказно в течение времени t_0 , начиная с момента времени t

$$P(t, t + t_0) = P\left\{ \begin{array}{l} \xi_1 > t + t_0 \\ \xi_1 > t \end{array} \right\} = \frac{P(t + t_0)}{P(t)}.$$

Вероятность отказа в интервале времени от t до $t + t_0$

$$Q(t, t + t_0) = P\{\xi_1 > t + t_0 / \xi_1 > t\} = P(t) - \frac{P(t + t_0)}{P(t)}.$$

Интенсивность отказов в момент времени t – условная плотность вероятности отказов к моменту времени t при условии, что до этого момента отказ элемента не произошел

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{1}{1 - F(t)} \cdot \frac{dF(t)}{dt},$$

где $f(t)$ – плотность распределения случайной величины.

Средняя наработка до первого отказа – математическое ожидание случайной наработки до первого отказа

$$T_1 = M\{\xi_1\} = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt.$$

Среднее число отказов за время t – математическое ожидание случайной величины числа отказов за время t

$$H = M\{r(t)\} = \int_{n=1}^{\infty} n P_n(t),$$

где $P_n(t) = P\{r(t) = n\}$.

Параметр потока отказов – безусловная вероятность отказа на интервале времени Δt при $\Delta t \rightarrow 0$

$$w(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \approx \frac{1 - P(t, t + \Delta t)}{\Delta t}.$$

Для стационарного процесса

$$w(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{H(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{dH(t)}{dt}.$$

Средняя наработка на отказ – отношение суммарной наработки T_p за заданный период времени к среднему числу отказов за это же время

$$T_{cp} = \frac{T_p}{H}.$$

Вероятность восстановления за заданное время – вероятность того, что случайная величина времени восстановления η будет меньше заданного времени восстановления t , или вероятность того, что за время t восстановление будет закончено

$$P_b(t) = P(\eta < t).$$

Интенсивность восстановления – условная плотность вероятности восстановления в момент времени t при условии, что до момента времени t восстановление не произошло

$$\mu(t) = \frac{f_b(t)}{1 - F_b(t)}.$$

Среднее время восстановления – математическое ожидание случайной величины времени восстановления

$$\tau_b = M\{\eta\} = \int_0^{\infty} x dF_b(x) = \int_0^{\infty} x f_b(x) dx.$$

Из комплексных показателей надежности для элементов ТСС могут применяться:

стационарный коэффициент готовности K – вероятность нахождения элемента в состоянии работоспособности

$$K = \frac{t_0}{t_p} = \frac{T}{T + \tau_b};$$

коэффициент простоя k – вероятность нахождения элемента в состоянии неработоспособности

$$k = 1 - K = \frac{\tau_b}{T + \tau_b}. \quad (2.2)$$

2.2 Показатели надежности ТСС

Выбор показателей надежности сложных систем зависит от особенностей систем и выполняемых ими функций, от типа решаемых задач, от наличия и достоверности информации.

Первая особенность связана с основной функцией ТСС – обеспечивать тепловой энергией потребителей, рассредоточенных по узлам тепловой сети, в соответствии с их требованиями к количеству и качеству подаваемой теплоты. Последствия отказов зависят здесь не только от их продолжительности и глубины, но и от распределения дефицита по узлам сети.

Другой особенностью ТСС является разнородность тепловой нагрузки потребителей с разными требованиями к надежности их обеспечения. Это обуславливает необходимость дифференцированной оценки надежности обеспечения данных нагрузок.

Многоуровневый характер функционирования ТСС и возможность определенного снижения подачи тепловой энергии во время аварийных ситуаций приводят к необходимости оценки надежности по уровням функционирования (уровням надежности).

В качестве узловых показателей надежности (ПН) r -го ($r \in R_k$) уровня могут применяться вероятность безотказной работы, вероятность отказа, среднее число отказов, коэффициент готовности, вычисленные за расчетный отрезок времени (здесь R_k - множество рассматриваемых уровней надежности).

Кроме того, для каждого узла j ($j \in J$) определяются:

среднее значение выходного эффекта q_j^{cp} – среднее часовое количество теплоты, подаваемого в узел j :

$$q_j^{cp} = M \{q_j\} = \sum_{r=0}^{R_r} q_{jr} P_r; \quad (2.3)$$

коэффициент сохранения эффективности

$$\bar{q}_j^{cp} = \frac{q_j^{cp}}{q_0} = P_0 + \sum_{r=0}^{R_r} \bar{q}_{jr} P_r;$$

среднечасовой недоотпуск тепловой энергии или средний дефицит тепловой мощности

$$\Delta q_j^{cp} = M \{ \Delta q_j \} = \sum_{r=1}^{R_r} P_r (q_{j0} - q_{jr}) ;$$

коэффициент обеспеченности относительно расчетной часовой подачи тепловой энергии

$$K_j^{об} = \frac{q_{j0} - \Delta q_j^{cp}}{q_{j0}} = 1 - \frac{\Delta q_j^{cp}}{q_{j0}} = 1 - \Delta \bar{q}_j^{cp} , \quad (2.4)$$

здесь J – множество узлов потребления; q_{jr} – количество теплоты, подаваемое в узел j на r -м уровне (при $r = 0$ – полностью рабочее состояние); P_r – вероятность реализации r -го уровня.

В качестве интегральных для ТСС могут применяться ПН [см. формулы (2.3), (2.4)], а также показатель качества функционирования системы $R_{ст}(t)$. Для ТСС в целом некоторые ПН типа [см. формулы (2.1), (2.2)] теряют смысл. При анализе и синтезе надежности отдельных элементов ТСС могут потребоваться и другие показатели, отражающие специфику данных элементов. Определение показателя $R_{ст}(t)$ будет рассмотрено далее.

Выбор конкретных ПН производится при постановке задачи, поскольку они связаны с критерием отказа функционирования.

Кроме того, при глубоком недоотпуске тепловой энергии необходимо учитывать безопасность и живучесть ТСС.

Контрольные вопросы

1. Что означает «Наработка на отказ и между отказами»?
2. В чем отличие параметра потока отказов от интенсивности отказов?
3. Стационарный коэффициент готовности.
4. Определение вероятности безотказной работы.
5. Почему необходима дифференцированная оценка надежности теплоснабжения потребителей?
6. Коэффициент обеспеченности теплоснабжения.

3 Общие принципы решения задач анализа и синтеза надежности ТСС

3.1 Основные методические положения

Методические положения подходов к расчету надежности теплоснабжения и синтезу надежных ТСС, вытекающие из особенностей и свойств систем:

1. Оценка надежности ТСС производится узловыми показателями или ими дополняется.

2. Рассматривается R_k уровней надежности (расчетный и пониженные).

3. Отказом функционирования в j -м узле относительно $г$ -го уровня надежности считается:

- по отопительно-вентиляционной нагрузке – снижение температуры воздуха t_b в зданиях, подключенных к j -му узлу, ниже граничного минимального для данного уровня значения (t_{\min}^r);

- по нагрузке горячего водоснабжения – перерыв в ее обеспечении в узле j длительностью большей, чем граничное значение для данного уровня значения.

4. Выбор количества рассматриваемых уровней и значений относится к вопросам нормирования и решается на основе исследования микроклимата в зданиях.

5. Модели расчета ПН в задачах анализа объединяют вероятностные модели функционирования системы, детерминированные модели нестационарного теплообмена в зданиях и расчеты послеаварийных режимов.

6. Вероятность состояний системы и ПН определяются при $t_{нр}$ (расчетная температура наружного воздуха для проектирования ТСС) в разрезе отопительного периода с учетом графиков нагрузок и продолжительности.

7. В задачах синтеза надежности из экономического критерия исключается величина ущерба от недоотпуска тепловой энергии, но вводятся ограничения, отражающие требования к надежности теплоснабжения потребителей в соответствии с их категоричностью.

8. На основе вероятностных оценок уровней надежности выделяются резервируемая и нерезервируемая части ТС.

9. Решения по структуре и параметрам систем обосновываются по оценке надежности обеспечения отопительно-вентиляционной нагрузки.

10. При анализе и синтезе надежности все подсистемы и элементы ТСС отражаются в расчетной схеме. Степень детализации зависит от характера решаемых задач и поставленных целей.

3.2 Состав задач анализа и синтеза надежности ТСС

В многоэтапном процессе решение задач анализа и синтеза надежности ТСС относится к этапам их перспективного и текущего проектирования и эксплуатации.

В целом задача синтеза надежности ТСС состоит в обосновании структуры и параметров системы, изменяющихся во времени в соответствии с ростом тепловых нагрузок и другими изменяющимися условиями развития, при мини-

мальных затратах и удовлетворении требований надежности, физико-технических условий функционирования систем и ограничений на параметры режимов.

Задачи анализа надежности ТСС заключаются в количественной оценке надежности системы при фиксированной структуре и параметрах.

Состав задач анализа надежности включает определение:

- показателей надежности источников теплоты (ИТ);
- показателей надежности теплоснабжения потребителей;
- интегрального показателя надежности тепловой сети (ТС).

Состав задач синтеза надежности ТСС представлен в виде взаимосвязанных структурной и параметрической задач, решаемых на технико-экономическом и физико-техническом уровнях (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Состав задач синтеза надежности ТСС

Особенности проявления свойства динамичности и умеренное проявление свойства неполноты информации проводят к необходимости организации непрерывного (скользящего) процесса принятия решений, позволяющего отслеживать развитие системы, принимать к реализации лишь решения для ближайшего временного интервала и с течением времени корректировать решения для следующих интервалов расчетного периода.

Весь расчетный период делится на временные интервалы. На первом интервале (1-3 года) решаются текущие и безотлагательные задачи (ремонт, заме-

на элементов ТСС, коррекция потребления и отпуска теплоты). На втором временном интервале (2-5 лет) решаются задачи уточнения структуры, прогнозных оценок теплотребления и технико-экономических показателей эксплуатации ТСС, энергосбережения. Третий интервал расчетного периода (до 15-20 лет) является основным для формирования и решения комплекса задач обеспечения надежности ТСС с учетом перспективных оценок теплотребления и достижений технологии получения, передачи и использования тепловой энергии.

Выделим основные этапы решения задач синтеза надежности ТСС.

Технико-экономический уровень:

Для последнего временного интервала (третьего, 15 лет) расчетного периода строится избыточная схема системы.

На полученной избыточной схеме определяется оптимальная (без учета надежности) структура системы. На основе расчетов ПН теплоснабжения выделяется резервируемая часть ТС и определяются избыточные к нормальному режиму потоки.

Аналогичная задача решается для первого временного интервала (1 год) для структуры системы, полученной на предыдущем этапе.

Физико-технический уровень:

Избыточные потоки, полученные на 2-м и 3-м этапах, преобразуются в конкретные параметры системы с учетом ограничений.

На основе решений, полученных для первого и последнего (15 лет) интервалов, производится выбор решения для непосредственной реализации с учетом следующих рекомендаций:

состав вновь вводимых элементов (ИТ, НС и участков ТС) принимается для ближайшего уровня нагрузок, диаметры же новых участков сети соответствуют максимальным из полученных для разных временных интервалов;

если для реконструируемого участка сети на разных временных интервалах оказываются необходимыми разные параметры, то в окончательное решение включается больший диаметр;

если реконструкция участка оказалась необходимой, но не для ближайшего интервала, то она пока откладывается.

Для выбранной структуры системы и параметров ее элементов производится корректировочный оптимизационный расчет, в котором проверяется выполнение технических ограничений и корректируются зоны действия источников теплоты, располагаемые напоры на их коллекторах, напоры НС и потоко-распределения в тепловых сетях.

При перспективном проектировании выполняются все перечисленные этапы и решаются все задачи. Текущему проектированию соответствуют первый и второй интервалы времени (1-5 лет). На этом уровне информация становится практически однозначно определенной, то есть для фиксированного уровня нагрузок решается задача синтеза надежности (2, 4 и 6 этапы).

Практика эксплуатации ТСС показывает, что необходимо систематическое решение задач синтеза (каждые 1-2 года) в процессе эксплуатации. Основными решениями при этом являются уточнение зон действия ИТ, располагае-

мых напоров, выбор схемы коммуникаций и параметров настройки регуляторов. В некоторых случаях возможна реконструкция.

Контрольные вопросы

1. Состав задач синтеза надежности ТСС.
2. Состав задач анализа надежности ТСС.
3. Уровни решения задач синтеза надежности ТСС.
4. Назначение корректирующего расчета при оптимизации ТСС.

4 Элементы теории вероятностей

4.1 Основные характеристики случайных величин

Основным понятием в теории вероятностей является понятие о случайной величине. Случайной называют величину, которая может принимать то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно. Приходится иметь дело с дискретными и непрерывными случайными величинами. Первые могут принимать только отдельные друг от друга значения, а вторые непрерывно заполняют некоторый промежуток на числовой оси. К дискретным случайным величинам относятся число агрегатов или элементов, число отказов за прошедший отрезок времени и др. К непрерывным случайным величинам относятся наработка до отказа или между отказами.

Вероятность события представляет численную меру степени объективной возможности этого события. Соответственно, событием называют признак изучаемого параметра – отказ оборудования, наработка на отказ, длительность восстановления и т.п.

Вначале рассмотрим пример значимости определения вероятностей для проектирования системы горячего водоснабжения в здании.

За событие A примем, что в часы пиковой нагрузки ГВС в квартире включено горячее водоснабжение – включен кран. Предположим, что вероятность этого события $P(A) = 0,1$, тогда с вероятностью $q = 1 - P = 1 - 0,1 = 0,9$ этого события не произойдет – кран не включен. Рассмотрим вероятности события A для 5 квартир (n опытов = 5). Случайная величина m – число включенных кранов в час пик потребления горячей воды.

В данном случае вероятность случайной величины m описывается биномиальным распределением и определяется по формуле Бернулли:

$$P_n^m = C_n^m \cdot P^m \cdot (1 - P)^{n-m} = \frac{n!}{m! \cdot (n - m)!} P^m (1 - P)^{n-m},$$

где P_n^m – вероятность одновременного включения m кранов из n .

Значения вероятностей P_n^m при $m = 0 \div n$ будет следующее:

m	0	1	2	3	4	5
P	0,59049	0,32805	0,0729	0,0081	0,00045	0,00001.

Из расчетов следует, что с вероятностью 0,59049 в часы пик не будет включен ни один кран. С вероятностью $P = P_5^0 + P_5^1 + P_5^2 = 0,99144$ будет включено не более двух кранов. Если принять, что надежность обеспечения горячей водой составляет 0,99, то расчетное значение коэффициента одновременности для пяти кранов можно принять $K_0 = 2/5 = 0,4$. Это позволяет при проектировании разводки внутри здания трубопроводов горячего водоснабжения максимальный диаметр принимать из расчета 0,4 от суммарной производительности пяти кранов.

Закон распределения случайной величины χ наиболее полно отражается функцией распределения

$$F(x) = P(\xi < x).$$

Функцией распределения случайной величины ξ называется вероятность того, что ξ примет значение меньше, чем x . Функция распределения $F(x)$ является неубывающей функцией аргумента x , следовательно, при $x_2 > x_1$ функция $F(x_2) \geq F(x_1)$. При $x = -\infty - F(x) = 0$, а при $x = +\infty - F(x) = 1$.

Первая производная функции $F(x)$ называется плотностью распределения или плотностью вероятности непрерывной случайной величины

$$f(x) = F'(x).$$

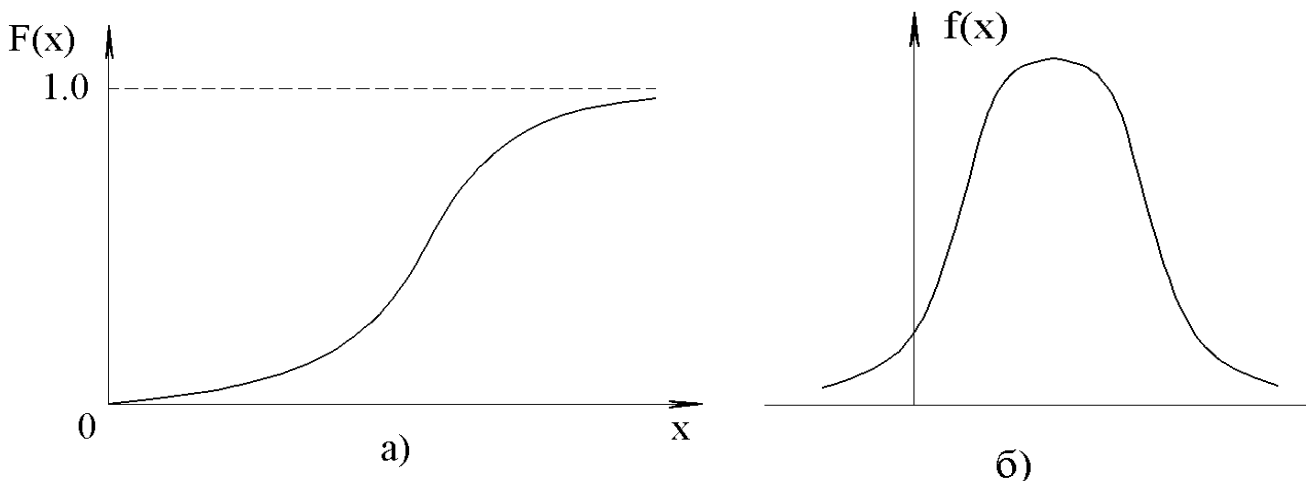


Рисунок 4.1 – Вид функций распределения (а) и плотности распределения (б) случайной величины X

Функция распределения безразмерна, а размерность плотности распределения обратна размерности случайной величины (рис. 4.1).

В качестве характеристик закономерностей распределения служат так называемые «моменты». Наиболее часто используются моменты двух видов: начальные и центральные.

Начальный момент порядка S :

для дискретной случайной величины x

$$a_s^* | x | = \sum_{i=1}^n x_i^s \cdot P_i ;$$

для непрерывной случайной величины x

$$a_s | x | = \int_{-\infty}^{\infty} x^s f(x) dx .$$

Числовые значения моментов порядка S характеризуют положение случайной величины на числовой оси: $S = 1$ – математическое ожидание; $S = 2$ – дисперсия случайной величины; $S = 3$ – мода случайной величины и $S = 4$ – медиана случайной величины.

Математическое ожидание случайной величины:

при дискретном значении x

$$m_s^* = M^* | x | = \sum_{i=1}^n x_i \cdot P_i ;$$

при непрерывном значении x

$$m_s = M|x| = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) \cdot dx .$$

Модой M случайной величины называется ее наиболее вероятное значение, то есть в точке M плотность вероятности максимальна (рисунок 4.2).

Медианой случайной величины x называют такое значение Me , для которого $P(x) < Me = P(x) > Me$, то есть одинаково вероятно, что случайная величина окажется больше или меньше значения Me . Графически на площади под функцией $f(x)$ до значения Me и после Me равны (рисунок 4.2).

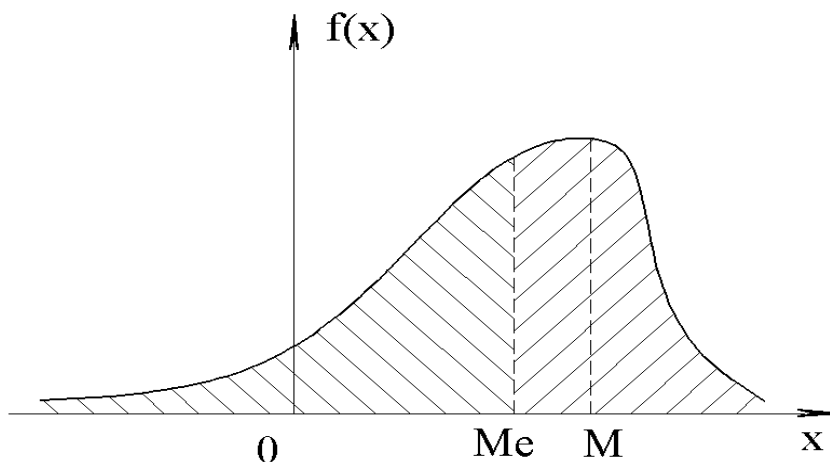


Рисунок 4.2 – Определение моды и медианы непрерывной случайной величины

Центрированной случайной величиной χ называют значение $\overset{\circ}{x}$ с учетом отклонения случайной величины x от ее математического ожидания

$$\overset{\circ}{x} = x - m .$$

Данное соотношение равносильно переносу начала координат в среднюю (центральную) точку, то есть в точку математического ожидания величины x . Соответственно моменты носят название центральных моментов. Численные значения моментов S -ого порядка

$$\mu_s[x] = M[\overset{\circ}{x}^s] = M[(x - m_x)^s] .$$

Для любой случайной величины центральный момент первого порядка равен нулю.

Широкое применение в практике и теории надежности получил второй центральный момент – дисперсия случайной величины

$$\mu_2 = D[x] = M[x^2] .$$

Дисперсия случайной величины характеризует рассеяние (разброс) значений величины около ее математического ожидания.

Для дискретных случайных величин

$$D^*[x] = \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2 \cdot P_i ,$$

а для непрерывных

$$D[x] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 \cdot f(x) dx .$$

Размерность $D[x]$ равна квадрату размерности случайной величины, поэтому удобнее пользоваться величиной $\sigma[x]$ – средним квадратичным отклонением случайной величины:

$$\sigma[x] = \sqrt{D[x]} .$$

Для удобства принято сокращение $\sigma[x] \equiv \sigma_x$, а $D[x] \equiv D_x$.

4.2 Законы распределения случайных величин

Закон распределения случайной величины – есть формализованное в виде стандартных зависимостей соотношение между величиной случайной величины и какой-либо формой описания вероятности данной величины.

4.2.1 Распределение дискретных случайных величин

Для дискретных случайных величин наибольшее применение получило биномиальное распределение. Вероятность того, что ровно m изделий из общего числа n откажет в работе определяется:

$$P_n^m = C_n^m \cdot p^m \cdot q^{n-m} = \frac{n!}{m! (n-m)!} \cdot p^m \cdot q^{n-m} ,$$

где p – вероятность безотказной работы одного элемента; $q = (1 - p)$ – вероятность отказа данного элемента.

Здесь нет зависимости p и q от длительности эксплуатации (времени). Если необходимо учесть время t , то значения p и q принимаются на момент окончания расчетного периода $t_1 - p(t), q(t)$.

По этому же закону вероятность того, что случайная величина m не превысит заданного значения m' определяется:

$$P(m \leq m') = \sum_{m=0}^{m'} C_n^m \cdot p^m \cdot q^{n-m} .$$

Математическое ожидание и дисперсия случайной величины, распределенной по биномиальному закону, находятся по формулам:

$$M[m] = n \cdot P ; D[m] = \sigma^2 [m] = nPq .$$

В общем случае биномиальному распределению «подчиняются» невосстанавливаемые изделия. Для восстанавливаемых изделий в большей мере подходит распределение Пуассона, по которому вероятность того, что случайная величина M (целая и положительная) примет значения m , находится по формуле

$$P(m) = \frac{1}{m!} \cdot a^m \cdot e^{-a} ,$$

где a – параметр распределения Пуассона.

Математическое ожидание и дисперсия распределения Пуассона равны

$$M[x] = \sigma^2[x] = a .$$

4.2.2 Распределения непрерывных случайных величин

Наиболее часто встречающийся на практике (не только надежности) и основным в теории вероятностей является нормальный закон распределения (закон Гаусса). Его главная особенность – он является предельным законом, к которому приближаются все остальные законы распределения при числе опытов, стремящемся к бесконечности.

Функция нормального распределения:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} dx ,$$

где a – математическое ожидание; σ – среднеквадратичное отклонение случайной величины.

Плотность вероятности нормального распределения находится по формуле

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} .$$

При значении $a = 0$ и $\sigma = 1$ функции $F(x)$ и $f(x)$ табулированы (нормированные и центрированные функции), их численные значения приведены в справочной литературе при значениях:

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx ;$$

$$f_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}} .$$

Для получения с помощью таблиц действительных значений $F(x)$ и $f(x)$ достаточно пересчитать аргумент:

$$F(x) = F_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right);$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \cdot f_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) .$$

Если наработка до отказа x распределена по нормальному закону, то вероятность безотказной работе в интервале от 0 до x находится

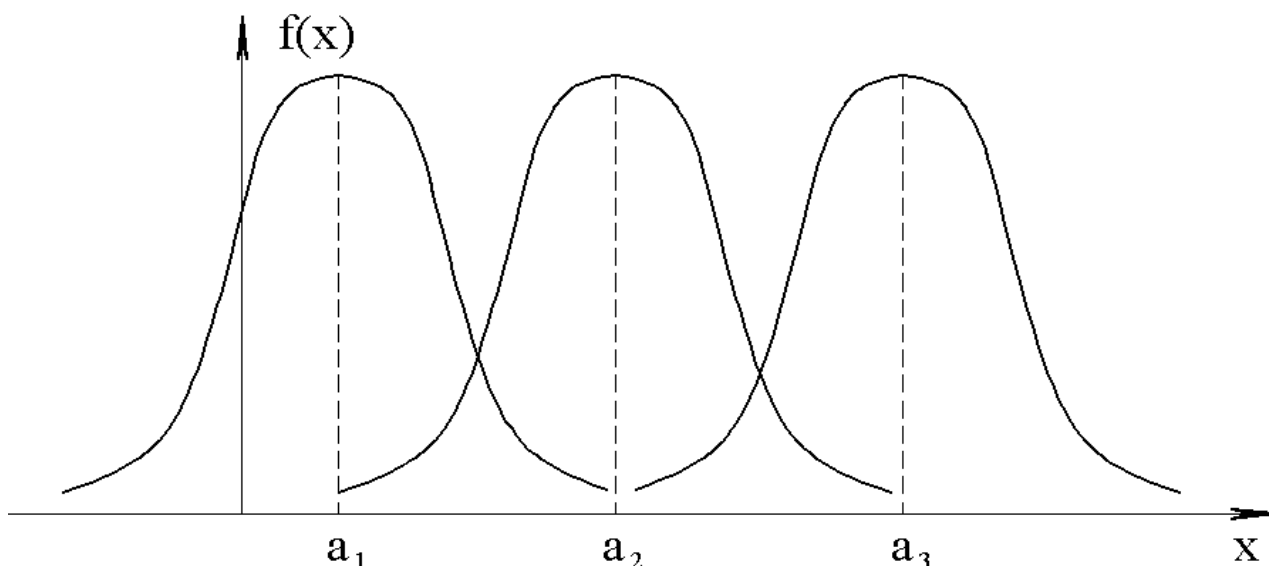
$$P(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = 1 - F(x) = 1 - F_0\left(\frac{a-x}{\sigma}\right) .$$

Интенсивность отказов

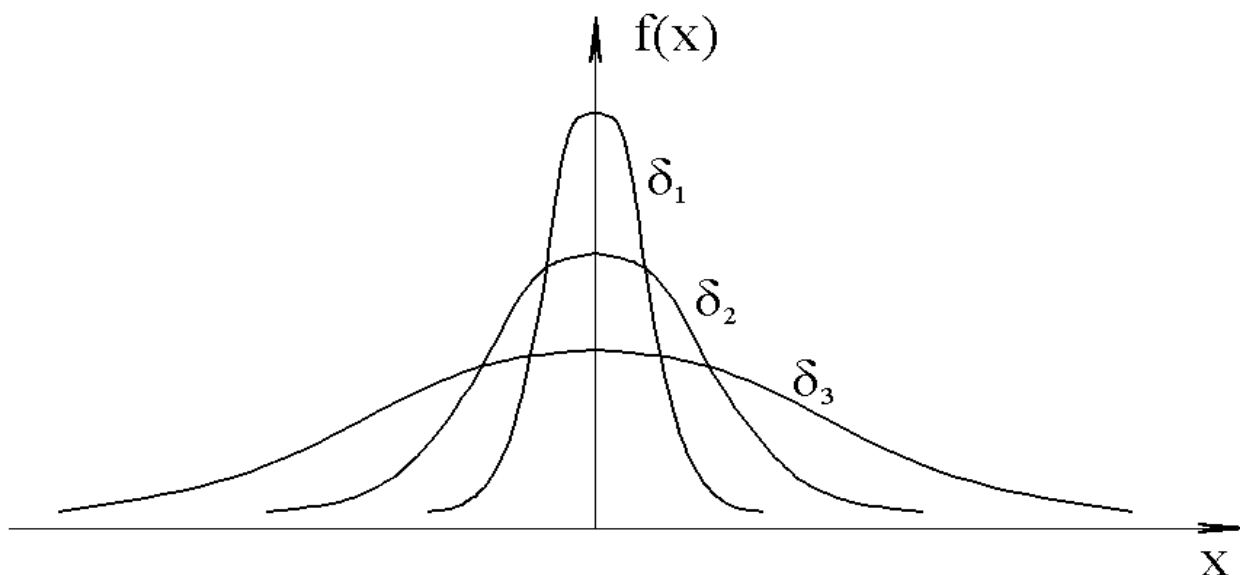
$$\lambda(x) = \frac{f(x)}{P(x)} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{f_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)}{F_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)} = \frac{1}{\sigma} \cdot f_1\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) ,$$

где $f_1\left(\frac{x-a}{\sigma}\right) = \frac{f_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)}{F_0\left(\frac{x-a}{\sigma}\right)}$ – табулированная функция.

Значения величин a и σ в зависимостях $f(x)$ изменяют форму кривой плотности распределения или сдвигают значение математического ожидания по оси x . При этом площадь под функцией $f(x) = \text{const}$ (рисунок 4.3).



а)



б)

Рисунок 4.3 – Влияние величин $a(a_1 < a_2 < a_3)$ и $\sigma(\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3)$ на кривую плотности нормального распределения: а) влияние математического ожидания; б) влияние среднеквадратического отклонения

В классических формулах определения $F(x)$ и $f(x)$ для нормального закона распределения аргумент изменяется от $-\infty$ до $+\infty$, на практике предел измерения

аргумента «урежают» от -3σ до $+3\sigma$, то есть аргумент x принимают в пределах от -3σ до $+3\sigma$. В этом случае распределение случайной величины называется нормальным усеченным распределением. При усечении распределения неучет изменения аргумента x за интервалом от -3σ до $+3\sigma$ составляет около 0,27%.

Логарифмически нормальное распределение применяется при расчетах вероятностных показателей работы элементов с учетом нагрузок и старения материала. В данном случае математическое ожидание наработки на отказ может иметь значение в несколько сотен тысяч часов, а время до первого отказа (по статистике) несколько часов, то есть на координате времени должны разместиться отрезки в несколько часов и несколько десятков тысяч часов.

Для определения функций $F(x)$ и $f(x)$ данного распределения для аргументов x , a и σ находят их логарифмы (\lg или \ln), и эти значения подставляют в зависимости для нормального распределения. Теоретически логарифмически нормальное распределение принимается при большом значении коэффициента вариации $\sigma/a > 1/3$.

Очень часто, особенно на начальных стадиях анализа и синтеза надежности технических систем, применяют экспоненциальный закон распределения. Этот закон по теории вероятностей применим для невозстановливаемых изделий (элементов), когда отказавший элемент «выбрасывается» из общего числа изделий. Но при условии замены отказавшего элемента на новый или при времени восстановления значительно меньше наработки на отказ (2-3 порядка), то с некоторым допущением этот закон можно применять. Применимость экспоненциального закона распределения объясняется также его простотой математического описания.

Функция распределения этого распределения:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x},$$

а плотность распределения равна:

$$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x),$$

где λ – параметр распределения.

Параметр λ при практических расчетах называют интенсивностью отказов и принимают $\lambda(t) = \text{const}$, то есть независимым от времени эксплуатации. В действительности интенсивность отказов зависит от времени эксплуатации элементов ТСС – $\lambda(t) \neq \text{const}$.

Функция $\lambda(t)$ для многих элементов имеет три характерных периода (рисунки 4.4).

Первый период от 0 до $T_{п}$ является периодом приработки, когда отказывают элементы, имеющие скрытые дефекты после изготовления монтажа или восстановления. Он характерен резким снижением интенсивности отказов и малым значением отрезка времени 0- $T_{п}$.

Второй период $T_{п}$ - $T_{и}$ – период нормальной работы, когда значение $\lambda(t) \approx \text{const}$, то есть практически не зависит от времени эксплуатации. Этот период является основным и наибольшим по длительности. Обычно этот период принимают за расчетный.

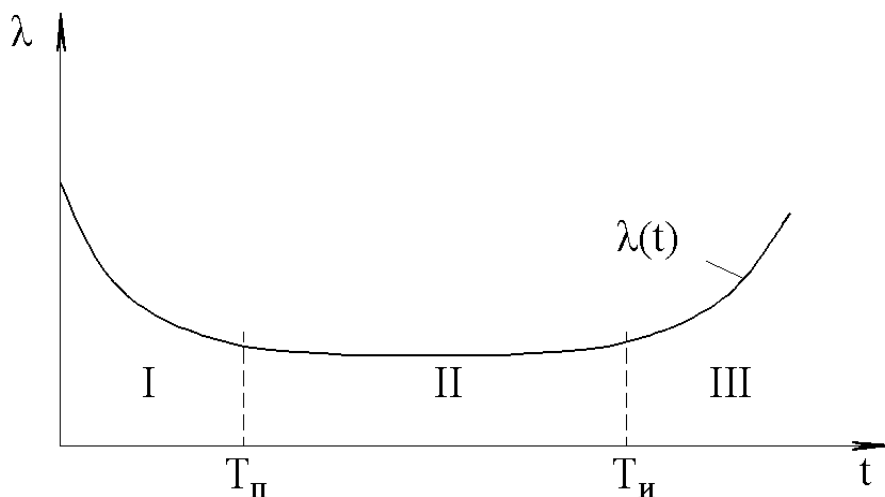


Рисунок 4.4 – Зависимость $\lambda(t)$ от времени t

После определенного периода эксплуатации сказываются износ и старение элементов, и интенсивность отказов начинает возрастать, то есть $\lambda(t)$ зависит от t . На практике стараются не допустить наступления *третьего периода* ($t > T_{и}$), производят восстановление или замену элементов.

При $\lambda = \text{const}$ – вероятность безотказной работы за время t определяется как

$$P(t) = e^{-\lambda t}.$$

Интенсивность отказов или упрощенно – количество отказов в единицу времени - в некоторых случаях приравнивают к параметру потока отказов $w(t)$. Принципиальная разница в определении $\lambda(t)$ и $w(t)$ – учет времени восстановления, при определении $\lambda(t)$ время восстановления не учитывается (или приравнивается нулю), а при определении $w(t)$ для потока «работа – восстановление» время восстановления учитывается.

Контрольные вопросы

1. Пояснить необходимость вероятностного определения показателей надежности.
2. Характеристика случайных величин (физический смысл).
3. Функции распределения и плотности распределения случайной величины.
4. Соотношение между дисперсией и среднеквадратичным отклонением случайной величины.
5. Необходимость знания законов распределения случайной величины.
6. Законы распределения дискретных случайных величин.
7. Законы распределения непрерывных случайных величин.
8. Влияние на форму $f(t)$ параметров нормального распределения.
9. Характер изменения интенсивности отказов во времени.

5 Статистическая оценка показателей надежности элементов ТСС

Цели статистических исследований надежности элементов ТСС:

1. Оценка и прогнозирование ПН элементов, характеризующих различные свойства надежности, и необходимых для анализа и синтеза надежности ТСС.

2. Выявление наименее надежных элементов и принятие решений по повышению их надежности.

3. Разработка нормативных значений ПН и требований к уровню технического обслуживания ТСС.

4. Прогнозирование постепенных отказов, которые не могут быть зафиксированы в случае ограниченного времени эксплуатации.

Для большинства элементов ТСС в силу их специфики основным источником информации являются данные эксплуатации, испытания, которого на испытательных стендах практически невозможны.

Рассмотрим некоторые определения из теории статистики.

Генеральная совокупность – вся совокупность объектов, из которых производится выборка.

Выборочная совокупность или *выборка* – совокупность случайно отобранных объектов.

Объем выборки – число объектов совокупности.

Существуют разные подходы при выборке объектов, так как все объекты при их большом числе обследовать очень сложно.

Если из генеральной совокупности извлечена выборка, в которой параметр x_1 наблюдался n_1 раз, x_2 наблюдался n_2 раз, а x_k – n_k раз, то объем выборки $n = \sum n_i$. Наблюдаемые значения x_i называют вариантами, а последовательность вариантов, записанных в возрастающем порядке – вариационным рядом. Значения n_i называют частотами, а отношение $\frac{n_i}{n} = w_i$ – относительными частотами.

По теории математической статистики необходимо обеспечить однородность информации, то есть испытания должны проводиться в одинаковых условиях, объекты должны быть одинаковой конструкции, рассчитанные на одинаковые параметры. В большинстве случаев для оборудования ТСС соблюсти данные требования не удастся. В этом случае подбирают подобные агрегаты (элементы), причины отказов которых одинаковы, хотя их параметры несколько различаются.

Статистический контроль однородности выборки осуществляется при помощи оценки среднеквадратичного отклонения или по размаху выборки. При этом с точки зрения надежности оценивается однозначность процессов, приводящих к отказам.

Например, при выборке в n элементов, для которых значения случайной величины составляют x_1, x_2, \dots, x_n , выборочное среднеквадратичное отклонение составит

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$ – выборочная средняя.

Партия считается пригодной, если S меньше заданного норматива C .

При втором методе контроля определяется размах выборки

$$\omega = x_{\max} - x_{\min}.$$

Условием пригодности данных испытания будет $\omega \leq C$.

Статистические данные дают картину надежности элементов и систем «прошлой» эксплуатации и пригодны для анализа состояния ТСС за какой-то период. Для решения вопросов синтеза надежности желательно знание законов распределения ПН во времени. Знания законов распределения позволяет применить математический аппарат теории вероятностей и распространить статистические данные на перспективу.

При подборе соответствующего закона распределения случайной величины обычно не обладают достаточным объемом данных и не всегда освобождены от элементов случайности. Но для элементов ТСС характер закона распределения качественно известен из теоретических соображений и законов старения элементов. Возникает более узкая задача – определение параметров (числовых характеристик) распределения.

На предварительном этапе первичный статистический материал систематизируют в порядке возрастающих значений, исправляют введением поправок на систематическую погрешность (при необходимости) и вычисляют среднее арифметическое значение результатов наблюдений. Затем оценивают их среднее квадратическое отклонение и выполняют сглаживание (выравнивание) статистических данных.

Выравнивание статистического ряда заключается в подборе плавной теоретической кривой распределения, наилучшим образом описывающей статистическое распределение. При сглаживании можно воспользоваться принципом наименьших квадратов отклонений, принимая такую функцию, для которой сумма квадратов отклонений минимальна. При этом значения параметров распределения эмпирической и теоретической функций должны совпадать с допустимой точностью. Далее следует проверить гипотезу о принадлежности результатов наблюдения к принятому по инженерным соображениям закону распределения. Для выполнения этой процедуры служат критерии согласия. Достаточно простым и часто применяемым в расчетах является критерий согласия А.Н. Колмогорова (рисунок 5.1). В этом случае определяется максимальное значение модуля разности между статистической $F^*(x)$ и теоретической $F(x)$ функциями распределения

$$D = \max |F^*(x) - F(x)|.$$

Последовательность применения критерия Колмогорова:

строят статистическую функцию распределения $F^*(x)$, затем предполагаемую теоретическую функцию $F(x)$ и определяют $\max |D|$ (рисунок 4.1); далее

определяют параметр $\lambda = D \sqrt{n}$ (n – число опытов) и по таблице вероятностей распределения Колмогорова находят значение $p(\lambda)$.

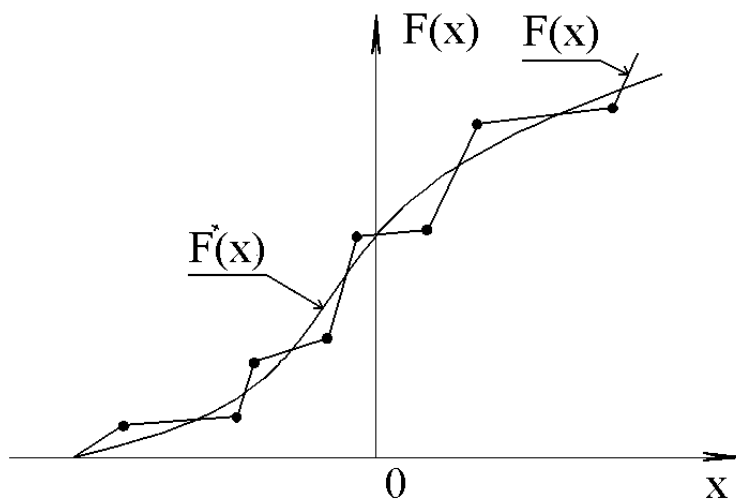


Рисунок 5.1 – Применение критерия А.Н. Колмогорова

В качестве критерия согласия используют и другие критерии, в частности, критерий Пирсона, именуемый также критерием χ^2 .

Объем статистического материала ограничен, поэтому точные значения параметров распределения получить невозможно, а приближенные значения называются оценкой параметра.

Различают точечную и интервальную оценки точности и надежности оценок параметров. При небольших объемах выборки предпочтительна интервальная оценка.

Пусть найденная статистически характеристика θ^* служит оценкой неизвестного (любого) параметра θ , соответствующего какому-то постоянному числу теоретической характеристики. Соответственно требуется обеспечить условие $|\theta - \theta^*| < \delta$, (δ – допустимое условие точности оценки параметра). Но статистические методы не позволяют категорически утверждать, что оценка θ^* удовлетворяет указанному условию, можно говорить лишь о вероятности γ , с которой это неравенство удовлетворяется, то есть

$$\gamma = P[|\theta - \theta^*| < \delta] \text{ или } P[\theta^* - \delta < \theta < \theta^* + \delta] = \gamma.$$

Значение γ представляет вероятность того, что интервал $(\theta^* - \delta, \theta^* + \delta)$ включает в себе неизвестный параметр θ . Этот интервал называется доверительным с заданной надежностью (вероятностью) γ .

Рассмотрим задачу определения доверительных интервалов для оценки математического ожидания нормального распределения. Для этого следует по данным выборки построить случайную величину

$$T = \frac{\bar{x} - a}{\sigma / \sqrt{n}},$$

где a – математическое ожидание, \bar{x} – выборочная средняя, σ – среднее квадратичное отклонение, n – объем выборки.

Величина T имеет распределение Стьюдента (псевдоним английского математика В. Гессета), плотность которого выражается формулой

$$f(t, n) = \frac{\Gamma(n/2)}{\sqrt{\pi \cdot (n-1)} \cdot \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} \cdot \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}},$$

где Γ – табулированная гамма-функция; $n - 1 = k$ – число степеней свободы распределения – параметр распределения Стьюдента.

Заданная доверительная вероятность γ определяются формулой

$$P\left|\frac{\bar{x} - a}{S\sqrt{n}}\right| < t_\gamma = 2 \int_0^{t_\gamma} f(t, n) dt = \gamma.$$

Пример. При выборе объема $n = 20$ найдены выборочная средняя $\bar{x} = 25,6$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma = 0,7$. Требуется оценить неизвестное математическое ожидание нормального распределения при помощи доверительного интервала с надежностью $0,99$.

Решение. Пользуясь таблицей для распределения Стьюдента при $\gamma = 0,99$ и $n = 20$, находим $t_\gamma = 2,861$. Определим доверительные границы:

$$\begin{aligned} \bar{x} - \frac{t \cdot \gamma \cdot \sigma}{\sqrt{n}} &= 25,6 - \frac{2,861 \cdot 0,7}{\sqrt{20}} = 25,152 \quad ; \\ \bar{x} + \frac{t \cdot \gamma \cdot \sigma}{\sqrt{n}} &= 25,6 + \frac{2,861 \cdot 0,7}{\sqrt{20}} = 26,048 \quad . \end{aligned}$$

Итак, с вероятностью $0,99$ параметр a заключен в доверительном интервале $25,152 < a < 26,048$.

5.1 Статистические показатели надежности элементов оборудования ТСС

Как отмечалось ранее, основным источником статистической информации являются данные эксплуатации. Первичными носителями информации являются карты отказов, заполняемые эксплуатационным персоналом, а также базы данных об отказах элементов ТСС. Базы данных и карты отказов составляются отдельно для источников теплоты, насосных станций, тепловых пунктов и линейной части тепловых сетей. В базе данных должна быть отражена характеристика объекта и карта отказов.

Так, характеристика ТС должна включать:

- тип теплопровода (транзитный, магистральный и т.д.);
- дату ввода в эксплуатацию (год перекладки);
- дату последнего ремонта;
- длину участка, диаметр, толщину стенки, материал;
- глубину прокладки;
- тип грунта, влажность, коррозионность;

- тип прокладки; тип и конструкцию канала;
- вид гидро- и теплоизоляции и их толщину;
- уровень и наличие грунтовых вод (сухо, периодическое затопление, постоянное затопление);
- наличие течи с перекрытий канала (нет, периодическая, постоянная);
- наличие дренажа;
- наличие и тип электрохимической защиты;
- пересечение с другими инженерными коммуникациями;
- рабочее давление;
- давление опрессовки.

Карта отказов для элементов ТС должна содержать:

- месторасположение участка в сети (номер ИТ, района, магистрали, начала и конца участка);
- характер повреждения;
- дату (число, месяц, год) и час возникновения отказа;
- дату (число, месяц, год) и час отключения отказавшего участка;
- наличие дистанционного управления отключающей арматуры;
- давление теплоносителя на момент отказа;
- состояние конструкций канала, гидро- и теплоизоляции, наружной и внутренней поверхности трубы;
- тип покрытия поверхности земли над теплопроводом (асфальт, бетон, газон, не спланированная территория и т.п.);
- состояние дренажа и затопленность теплопровода водой;
- время восстановления;
- дату (число, месяц, год) и час включения отказавшего участка;
- характеристику ремонтных работ (замена участка трубопровода, заварка свища, ремонт конструкций канала и т.д.).

Приведенные далее данные о показателях надежности ТСС приняты по данным [1].

Информация, приведенная в таблицах 5.1 и 5.2, базируется на анализе эксплуатации (более 10-ти лет) нескольких десятков производственно-отопительных котельных.

Таблица 5.1 – Распределение отказов по элементам котельных установок

Оборудование	Кол-во отказов, шт./ %	Количество отказов элементов, шт./ %				
		Трубные поверхности	Арматура	Приборы	Барботаж, регистры и др. оборудование котлов	Прочие отказы
1	2	3	4	5	6	7
Котлы ДКВР	$\frac{893}{100}$	$\frac{236}{26,4}$	$\frac{284}{31,8}$	$\frac{162}{18,1}$	-	$\frac{211}{23,6}$

Продолжение таблицы 5.1

1	2	3	4	5	6	7
Котлы ДЕ	$\frac{51}{100}$	$\frac{14}{27,5}$	$\frac{18}{35,3}$	$\frac{9}{17,7}$	-	$\frac{10}{19,6}$
Экономайзеры	$\frac{111}{100}$	$\frac{51}{46,0}$	$\frac{54}{48,7}$	-	-	$\frac{6}{5,4}$
Сетевые подогреватели	$\frac{92}{100}$	$\frac{75}{81,5}$	$\frac{5}{3,3}$	-	-	$\frac{14}{15,2}$
Фильтры ХВО	$\frac{94}{100}$	-	$\frac{52}{55,3}$	-	$\frac{42}{44,7}$	-
ДСА	$\frac{32}{100}$	-	$\frac{16}{50,0}$	-	$\frac{16}{50}$	-
Мазутные баки	$\frac{25}{100}$	$\frac{9}{36,0}$	-	-	$\frac{16}{64,0}$	-

Таблица 5.2 – Распределение отказов по элементам вспомогательного оборудования котельных

Оборудование	Кол-во отказов, шт./ %	Количество отказов элементов, шт. /%						
		Сальниковые уплотнения	Подшипники	Рабочие колеса	Валы	Муфты	Электродвигатели	Прочие
Насосы Д, НДВ, К	$\frac{192}{100}$	$\frac{32}{16,7}$	$\frac{52}{27,1}$	$\frac{23}{12,0}$	$\frac{27}{14,1}$	$\frac{20}{10,4}$	$\frac{25}{13,0}$	$\frac{13}{6,8}$
Насосы ЦНСГ	$\frac{222}{100}$	$\frac{22}{9,9}$	$\frac{73}{32,9}$	$\frac{13}{5,9}$	$\frac{6}{2,7}$	$\frac{30}{13,5}$	$\frac{41}{18,5}$	$\frac{37}{16,7}$
Насосы В	$\frac{77}{100}$	$\frac{25}{32,5}$	$\frac{14}{18,2}$	-	$\frac{2}{2,6}$	$\frac{6}{7,8}$	$\frac{7}{9,1}$	$\frac{23}{29,9}$
Вентильторы ВД, ВДН	$\frac{129}{100}$	$\frac{10}{7,8}$	$\frac{27}{20,9}$	$\frac{26}{20,2}$	-	$\frac{39}{30,2}$	$\frac{24}{18,6}$	$\frac{3}{2,3}$
Дымососы Д	$\frac{260}{100}$	$\frac{22}{8,5}$	$\frac{73}{28,1}$	$\frac{30}{11,5}$	$\frac{30}{44,5}$	$\frac{23}{8,9}$	$\frac{62}{23,9}$	$\frac{20}{7,7}$

В таблицах 5.3 и 5.4 приведены результаты оценки параметров распределения наработки на отказ и времени восстановления некоторого оборудования котельных. Для экспоненциальных распределений параметрами являются интенсивность отказов λ и интенсивность восстановления μ . Вместе с точечными средними значениями величин λ и μ приведены значения их нижних λ_n , μ_n и верхних λ_b , μ_b границ, определенных с заданной доверительной вероятностью $\gamma = 0,9$, а также объем выборки n .

Таблица 5.3 – Интенсивности отказов (λ), их нижние $\lambda_{н}$ и верхние $\lambda_{в}$ границы для оборудования котельных

Наименование оборудования	Объем выборки значений наработки на отказ, шт.	$\lambda \cdot 10^4$, 1/ч	$\lambda_{н} \cdot 10^4$, 1/ч	$\lambda_{в} \cdot 10^4$, 1/ч
<i>Котлы</i>				
ДКВР-2,5-13 (мазут)	61	6,77	5,83	8,06
ДКВР-4-13 (мазут)	118	8,65	7,75	9,86
ДКВР-4-13 (газ)	28	6,92	5,46	9,06
ДКВР-6,5-13 (мазут)	122	6,54	5,86	7,44
ДКВР-6,5-13 (газ)	29	8,01	6,41	10,33
ДКВР-10-13 (мазут)	176	10,41	9,47	11,56
ДКВР-10-13 (газ)	55	8,51	7,32	10,12
ДКВР-20-13 (мазут)	99	12,51	11,15	14,38
ДКВР (всего)	688	8,70	8,27	9,13
ДЕ	51	8,87	8,27	9,48
«Братск»	21	2,63	2,05	3,46
<i>Питательные насосы</i>				
ЦНСГ-38	109	6,06	5,42	6,94
ЦНСГ-60	78	6,14	5,33	7,14
ЗМСГ № 10	35	6,49	5,29	8,21
<i>Сетевые насосы</i>				
Д	63	9,53	8,17	11,17
НДВ	25	5,35	4,23	7,12
ЧК-6, ЧК-8	45	7,24	6,09	8,87
<i>Подпиточные насосы</i>				
2К-6	59	6,33	5,40	7,47
<i>Мазутные насосы</i>				
В	53	4,58	3,87	5,52
РЗ	24	4,48	3,54	5,95
<i>Дымососы</i>				
Д-8	66	8,12	6,98	9,49
Д-10	57	5,23	4,45	6,22
Д-12,5	95	5,53	4,89	6,36
Д-13,5	42	4,91	4,07	6,05
<i>Вентиляторы</i>				
ВД-8	52	5,72	4,82	6,93
ВД-10	53	4,91	4,15	5,94
ВДН-112	24	5,85	4,56	7,76
<i>Экономайзеры</i>				
ВТИ	111	4,63	4,14	5,29
<i>Сетевые подогреватели</i>				
МВН	50	3,99	3,35	4,83
ОСТ	42	4,18	3,47	5,15
Фильтры ХВО	94	3,49	3,08	4,01
Деаэраторы ДСА	32	2,97	2,39	3,82
Мазутные баки	25	2,86	2,23	3,76

Таблица 5.4 – Интенсивности восстановления (μ), их нижние μ_n и верхние μ_v границы для оборудования котельных

Наименование оборудования	Объем выборки значений наработки на отказ, шт.	$\mu \cdot 10^2$, 1/ч	$\mu_n \cdot 10^2$, 1/ч	$\mu_v \cdot 10^2$, 1/ч
<i>Котлы</i>				
ДКВР-4-13 (мазут)	118	2,78	2,49	3,17
ДКВР-6,5-13 (мазут)	122	2,39	2,14	2,72
ДКВР-10-13 (мазут)	314	2,08	1,99	2,24
ДКВР-10-13 (газ)	55	1,84	1,56	2,21
ДКВР-20-13 (мазут)	52	1,93	1,63	2,34
ДКВР (всего)	661	2,20	2,10	2,32
ДЕ	51	2,27	1,88	2,74
«Братск»	21	2,99	2,33	3,93
<i>Питательные насосы</i>				
ЦНСГ-38	109	10,79	9,65	12,35
ЦНСГ-60	78	7,60	6,60	8,84
ЗМСГ № 10	35	13,00	10,60	16,40
<i>Сетевые насосы</i>				
Д	63	12,18	10,44	14,28
НДВ	25	11,50	9,00	16,30
ЧК-6, ЧК-8	45	12,30	10,30	15,00
<i>Подпиточные насосы</i>				
2К-6	59	13,98	11,93	16,51
<i>Мазутные насосы</i>				
В	53	14,51	12,26	17,50
РЗ	24	24,60	19,40	32,70
<i>Дымососы</i>				
Д-8	66	8,81	7,57	10,29
Д-10	57	7,71	6,56	9,17
Д-12,5	95	8,27	7,32	9,51
Д-13,5	42	7,25	6,01	8,93
<i>Вентиляторы</i>				
ВД-8	52	12,38	10,44	14,99
ВД-10	53	11,73	9,91	14,15
ВДН-112	24	10,75	8,37	14,26
<i>Экономайзеры</i>				
ВТИ	111	6,56	5,87	7,5
<i>Сетевые подогреватели</i>				
МВН	50	5,81	4,96	7,15
ОСТ	42	4,96	3,89	5,78
Фильтры ХВО	94	7,16	6,33	8,23
Деаэраторы ДСА	32	7,19	5,79	9,24
Мазутные баки	25	4,68	3,66	6,16

Приведенные данные показывают, что самым ненадежным элементом котельной является котел, который характеризуется наибольшим значением λ и наименьшим значением μ . В таблицах 5.3 и 5.4 даны показатели надежности

для котлов, работающих на мазуте (кроме котла «Братск»). Если проанализировать ПН угольных котлов, то надежность их будет еще ниже.

5.2 Показатели надежности оборудования ТЭЦ

Основное оборудование ТЭЦ находится в более благоприятных условиях эксплуатации, чем оборудование котельных. Во-первых, более стабильный режим работы. Во-вторых, на ТЭЦ выше уровень автоматизации процессов. В-третьих, более высокое качество обслуживания и проведения плановых ремонтов.

В таблице 5.5, 5.6 приведены усредненные за 5 лет (с 1986 по 1990 гг.) показатели надежности энергоблоков и турбин КЭС и ТЭЦ.

Таблица 5.5 – Средние показатели надежности энергоблоков

Показатели	Мощность энергоблока, МВт			
	КЭС		ТЭЦ	
	180-210	300	180	250
Наработка на отказ, ч	1250	1348	715	1320
Время восстановления, ч	39	42	54	29

Таблица 5.6 – Средние показатели надежности турбин

Турбина	Т-180, ЛМЗ	Т-250, ТМЗ	К-200, ЛМЗ	К-300, ХТЗ	К-300, ЛМЗ
Наработка на отказ, г	2831	6694	8850	4676	5576
Время восстановления, г	33	38	36	28	74,6

Из приведенных данных видно, что энергоблоки и отдельно турбины ТЭЦ имеют показатели надежности несколько ниже, чем КЭС. Это обусловлено, в основном, более переменным графиком работы и наличием дополнительных регулируемых отборов.

5.3 Тепловые сети

При анализе статистики об отказах элементов ТС необходимо учитывать следующие факторы:

1. За элемент тепловой сети принимается 1 км трубопровода, единица арматуры. При детальном исследовании необходимо выделять в качестве элементов – отвод, сварной стык, неподвижные опоры, так как эти элементы несут повышенную нагрузку.

2. Режим и уровень эксплуатации ТС отличаются даже для разных участков одной сети.

3. Наиболее опасная по коррозионным условиям температура сетевой воды находится в пределах 70-85 °С, то есть в наиболее тяжелых условиях находится подающие трубопроводы.

4. Значительная часть неисправностей ТС выявляются во время летних гидравлических испытаний.

По данным для Москвы за 1970-76 г.г. во время летних гидравлических и температурных испытаний выявлено от 50 до 90% повреждений из общего числа, то есть летние испытания снижают аварийность в отопительный сезон в 2-10 раз.

Статистический анализ показателей надежности пятнадцати наиболее крупных городов РФ [1] позволил сделать следующие выводы:

1. Кривая жизни теплопроводов не содержит приработочного периода, характерного для основного оборудования ТЭЦ и котельных.

2. Основная причина повреждений трубопроводов – наружная коррозия. Наружной коррозии подвержены теплопроводы практически независимо от способа прокладки, а основной причиной является увлажнение изоляции. Коррозионные процессы усиливаются при наличии блуждающих токов и коррозионно-активных грунтов.

3. В ТС 85-95% повреждений происходит в подающих трубопроводах.

4. Зависимость повреждений от диаметра теплопровода проявляется только при разной толщине стенки.

В таблицах 5.7 и 5.8 приведены данные по удельной повреждаемости Δn и параметру потока отказов ω только за отопительный период, исключая летние испытания (за один календарный год).

Примечание для таблиц 5.7 и 5.8:

$$\Delta n = \frac{\text{повр./}(\text{км} \cdot \text{ч})}{\text{повр./}(\text{км} \cdot \text{час в от. сезон})};$$

$$\omega = \frac{1/(\text{км} \cdot \text{ч})}{1/(\text{км} \cdot \text{час в от.сезон})}.$$

Для анализа ПН ТСС за отопительный период можно использовать данные, приведенные в таблицах 5.9 и 5.10.

Таблица 5.9 – Параметр потока отказов ω для 1 км двухтрубной ТС за отопительный сезон

Диапазон диаметров, мм	Среднее значение	Доверительный интервал (с вероятностью 0,9)	
Менее 300	$\frac{0,3 \cdot 10^{-4}}{0,148}$	Нет данных	
Не менее 300	$\frac{0,183 \cdot 10^{-4}}{0,09}$	$\frac{0,106 \cdot 10^{-4}}{0,052}$	$\frac{0,26 \cdot 10^{-4}}{0,128}$
Весь список	$\frac{0,238 \cdot 10^{-4}}{0,117}$	$\frac{0,16 \cdot 10^{-4}}{0,079}$	$\frac{0,315 \cdot 10^{-4}}{0,155}$

Примечание: $\omega = \frac{1/(\text{км} \cdot \text{ч})}{1/(\text{км} \cdot \text{час в от.сезон})}.$

Таблица 5.7 – Удельная повреждаемость Δn и параметр потока отказов ω для 1 км двухтрубной магистральной ТС в отопительном сезоне 1975 г. (по статистическим данным для 15 городов)

Срок службы, лет	Δn при диаметре теплопровода, мм				ω			
	300-350	400-450	500	600	700 и более	Среднее значение	Доверительный интервал (с вероятностью 0,9)	
0-9	$\frac{0,386 \cdot 10^{-5}}{0,019}$	$\frac{0,13 \cdot 10^{-4}}{0,064}$	$\frac{0,376 \cdot 10^{-5}}{0,019}$	0	0	$\frac{0,454 \cdot 10^{-5}}{0,022}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,961 \cdot 10^{-5}}{0,047}$
10-19	$\frac{0,22 \cdot 10^{-4}}{0,108}$	$\frac{0,335 \cdot 10^{-4}}{0,165}$	$\frac{0,241 \cdot 10^{-4}}{0,119}$	$\frac{0,298 \cdot 10^{-4}}{0,146}$	$\frac{0,643 \cdot 10^{-5}}{0,032}$	$\frac{0,237 \cdot 10^{-4}}{0,117}$	$\frac{0,138 \cdot 10^{-4}}{0,068}$	$\frac{0,337 \cdot 10^{-4}}{0,166}$
20 и более	$\frac{0,834 \cdot 10^{-4}}{0,41}$	0	$\frac{0,5751 \cdot 10^{-4}}{0,283}$	$\frac{0,109 \cdot 10^{-3}}{0,539}$	0	$\frac{0,491 \cdot 10^{-4}}{0,241}$	$\frac{0,205 \cdot 10^{-5}}{0,01}$	$\frac{0,959 \cdot 10^{-4}}{0,472}$
0-35	$\frac{0,24 \cdot 10^{-4}}{0,118}$	$\frac{0,215 \cdot 10^{-4}}{0,106}$	$\frac{0,226 \cdot 10^{-4}}{0,111}$	$\frac{0,205 \cdot 10^{-4}}{0,101}$	$\frac{0,407 \cdot 10^{-5}}{0,02}$	$\frac{0,183 \cdot 10^{-4}}{0,09}$	$\frac{0,106 \cdot 10^{-4}}{0,052}$	$\frac{0,26 \cdot 10^{-4}}{0,128}$

Таблица 5.8 – Удельная повреждаемость Δn и параметр потока отказов ω для 1 км двухтрубной магистральной ТС в 1975 г., включая летние испытания (по статистическим данным для 15 городов)

Срок службы, лет	Δn при диаметре теплопровода, мм				ω			
	300-350	400-450	500	600	700 и более	Среднее значение	Доверительный интервал (с вероятностью 0,9)	
0-9	$\frac{0,654 \cdot 10^{-5}}{0,0575}$	$\frac{0,183 \cdot 10^{-4}}{0,16}$	$\frac{0,217 \cdot 10^{-5}}{0,019}$	$\frac{0,285 \cdot 10^{-5}}{0,025}$	$\frac{0,194 \cdot 10^{-5}}{0,017}$	$\frac{0,668 \cdot 10^{-5}}{0,0585}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,14 \cdot 10^{-4}}{0,123}$
10-19	$\frac{0,123 \cdot 10^{-4}}{0,108}$	$\frac{0,275 \cdot 10^{-4}}{0,241}$	$\frac{0,305 \cdot 10^{-4}}{0,267}$	$\frac{0,334 \cdot 10^{-4}}{0,293}$	$\frac{0,753 \cdot 10^{-5}}{0,066}$	$\frac{0,184 \cdot 10^{-4}}{0,161}$	$\frac{0,491 \cdot 10^{-5}}{0,043}$	$\frac{0,318 \cdot 10^{-4}}{0,279}$
20 и более	$\frac{0,655 \cdot 10^{-4}}{0,574}$	$\frac{0,12 \cdot 10^{-4}}{0,105}$	$\frac{0,639 \cdot 10^{-4}}{0,56}$	$\frac{0,904 \cdot 10^{-4}}{0,792}$	-	$\frac{0,328 \cdot 10^{-4}}{0,287}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0,845 \cdot 10^{-4}}{0,74}$
0-35	$\frac{0,276 \cdot 10^{-4}}{0,242}$	$\frac{0,22 \cdot 10^{-4}}{0,193}$	$\frac{0,267 \cdot 10^{-4}}{0,234}$	$\frac{0,231 \cdot 10^{-4}}{0,202}$	$\frac{0,674 \cdot 10^{-5}}{0,059}$	$\frac{0,21 \cdot 10^{-4}}{0,184}$	$\frac{0,13 \cdot 10^{-4}}{0,114}$	$\frac{0,404 \cdot 10^{-4}}{0,354}$

Таблица 5.10 – Параметр потока отказов задвижек ω_3

Период	Среднее значение	Доверительный интервал (с вероятностью 0,9)	
1974 – 1977 гг.	$\frac{0,1 \cdot 10^{-6}}{0,00089}$	$\frac{0,788 \cdot 10^{-7}}{0,00069}$	$\frac{0,127 \cdot 10^{-6}}{0,00111}$
1979 – 1981 гг.	$\frac{0,57 \cdot 10^{-6}}{0,005}$	$\frac{0,114 \cdot 10^{-6}}{0,001}$	$\frac{0,103 \cdot 10^{-5}}{0,009}$

Примечание: $\omega_3 = \frac{1 / \text{ч}}{1 / \text{год}}$.

Числовые характеристики и закон распределения случайной величины времени восстановления теплопроводов после их отказов являются одними из основных ПН. Основными факторами, определяющими время восстановления теплопровода, являются: тип прокладки, тип повреждения, наличие АВС (аварийно-восстановительной служба), состав и оснащённость аварийно-восстановительной бригады (АВБ), диаметр теплопровода.

Все виды повреждений и соответствующих способов восстановления можно разделить на четыре типа: М1, М2, М3, М4.

К *первому типу повреждений* М1, не требующих производства сварочных и земляных работ, относятся неисправности сальников арматуры, неплотности дренажных узлов, воздушников, мелкие свищи в пределах тепловых камер. В большинстве случаев эти повреждения не вызывают необходимости опорожнения трубопроводов, а время восстановления не превышает двух часов, поэтому они не рассматриваются.

Второй тип повреждений (М2) также не требует производства сварочных работ, но предусматривает выполнение земляных и строительных работ по вскрытию канала, восстановлению изоляции и конструкций опор. К данному типу относятся мелкие точечные свищи, устранение которых выполняется с частичным или полным сбросом давления и частичным опорожнением трубопровода.

Третий тип повреждений (М3) требует выполнения строительных, земляных и сварочных работ с частичным опорожнением трубопровода.

Четвертый тип повреждения (М4) приводит к необходимости замены участка трубопровода, то есть полного опорожнения трубопровода.

Время восстановления существенно зависит от оперативности сбора аварийного персонала, точнее от того, существуют ли специальные аварийные бригады или формируются по мере необходимости.

В таблице 5.11. приведены статистически обработанные данные по 71 ТСС страны для разных групп диаметров и типов повреждений.

Таблица 5.11 Статистические характеристики времени восстановления

Показатель восстановления	Группа диаметров, мм					Тип повреждения		
	100 и менее	125-300	350-500	600-800	≥ 900	М2	М3	М4
Среднее время восстановления $\bar{\tau}$, ч	9,7	13,5	17,3	23,3	26,8	7,4	14,6	31,2
Среднеквадратичное отклонение σ , ч	6,3	8,8	10,3	12,8	16,3	1,8	6,2	13,4
Число данных	145	181	294	213	22	216	429	210
Предельная погрешность $\Delta\tau_B$ ($\gamma = 0,954$), ч	1,0	1,3	1,2	1,7	6,9	0,2	0,6	1,8

Путем обработки статистической информации в [1] приведены зависимости для определения среднего времени восстановления, полученные по данным моделирования (индекс «М») и статистики (индекс «С») при отсутствии специальных А В С:

$$\bar{\tau}_B^M = 2,8 + 19 \cdot d ;$$

$$\tau_B^C = 7,8 + 19 \cdot d ,$$

здесь диаметр d измеряется в метрах.

Приведенные данные (таблица 5.9) не учитывают местные условия эксплуатации ТСС, но для оценок надежности теплообеспечения ими можно воспользоваться, если нет данных по конкретной системе.

5.4 Насосные станции

Насосная станция (НС) – сложная техническая система, состоящая из многих элементов, в зависимости от состояния которых может находиться в состояниях частичного, полного отказа или полной работоспособности. Без учета электрической части основным элементом НС является насосный блок, состоящий из насосного агрегата, обратного клапана и двух отключающих задвижек. Следовательно, параметр потока отказов блока ω_B равен сумме потоков отказов элементов

$$\omega_B = \omega_{на} + \omega_{ок} + 2\omega_3 ,$$

где $\omega_{на}$, $\omega_{ок}$, ω_3 – соответственно параметры потоков отказов насосного агрегата, обратного клапана и задвижки.

Анализ повреждений элементов НС позволил выделить основные причины. В 30 % случаев отключение насосного агрегата происходит из-за износа сальников; в 30 % случаев – из-за необходимости замены подшипников; в 12 % – из-за ремонта или ревизии насоса; в 11% – из-за ремонта или ревизии электродвигателя; 3 % составляют повреждения автоматических регуляторов.

Данная статистика была собрана на 22 НС в ТСС Москвы за восемь отопительных периодов [2].

В результате обработки данных были получены следующие средние значения параметров потоков отказов (1/год): насосы $\omega_n = 0,74$; электродвигатели $\omega_d = 0,23$; насосные агрегаты $\omega_{на} = 0,97$, задвижки $\omega_3 = 0,015$. Для насосных

блоков ω_B получено значение с доверительным интервалом $0,5603 < \omega_B < 1,367$. В качестве расчетного значения можно принять $\omega_B = 1,37$ 1/год.

В нормативах по выбору числа рабочих и резервных насосов указано, что при установке четырех и более рабочих насосов резервные насосы не устанавливаются. Проведем обоснование данного положения с точки зрения надежности. Частичный отказ в данном случае может произойти при отключении, как минимум, двух насосов. Вероятность такого события можно описать зависимостью:

$$P_{ст.2}(t) = C_4^2 \cdot (1 - e^{-\omega_B t}) \cdot (1 - e^{-\omega_B 2\tau}) \cdot [1 - (1 - e^{-\omega_B t}) \cdot (1 - e^{-\omega_B 2\tau})].$$

При малых значениях $\omega_B t$, $\omega_B 2\tau$ величиной в квадратных скобках можно пренебречь. Здесь τ – время ремонта одного насосного блока (принимаем $\tau = 7$ часов); t – длительность отопительного периода, год.

Для Москвы $t = 0,562$ года.

Подставляя данные в зависимость $P_{ст.2}(t)$, получим вероятность отказа 2 блоков одновременно $P_{ст.2}(0,562) = 0,007$. При таком малом значении можно резервный насос не ставить.

Контрольные вопросы

1. Цель статистической оценки надежности ТСС.
2. Основные требования к выборке при статистической оценке надежности ТСС.
3. Построение закона распределения по статистическим данным.
4. Применение критерия согласия А.Н. Колмогорова.
5. Определение доверительных интервалов статистических оценок параметров распределения.
6. Определение элементов, наиболее влияющих на надежность ТСС.

6 Обеспечение надежного функционирования ТСС в процессе эксплуатации

6.1 Управление режимами ТСС

Изменение спроса на теплоту в течение эксплуатации требует управления режимами ТСС, то есть соответственно спросу должна изменяться и подача теплоты абонентам. Если система не приспособлена к управлению, то такую систему нельзя проектировать и строить.

Режимная управляемость ТСС рассматривается в двух аспектах: управляемость при поддержании нормального режима и режима лимитированного теплоснабжения в аварийных ситуациях.

Регулирование теплоты осуществляется двумя способами: путем изменения температуры теплоносителя и изменения расхода теплоносителя. Наиболее распространенный способ – это централизованное управление температурой теплоносителя и местное управление гидравлическим режимом. Установленная температура в соответствии с температурой наружного воздуха определяет максимальный тепловой потенциал теплоносителя, который при местном регулировании может быть только снижен. Индивидуальные потребности в теплоте регулируются путем изменения гидравлического режима на местах: дросселированием или подмешиванием. На динамический баланс подачи - спроса теплоты в процессе эксплуатации накладываются возмущения, которые можно сгруппировать:

1) изменение параметров наружной среды, температура наружного воздуха, скорость ветра, солнечная радиация. Эти процессы приводят к запаздыванию или опережению в подаче теплоты потребителям;

2) изменения интенсивности остывания теплоносителя и его расхода в трубах различного диаметра;

3) изменения располагаемого напора у потребителя, связанного с изменением расхода теплоносителя в магистралях.

Небалансы теплоты, обусловленные данными возмущениями, не всегда могут быть устранены с помощью автоматических регуляторов.

При снижении потребности в теплоте баланс регулируется прикрытием соответствующей арматуры. Если возмущения приводят к повышению спроса на теплоту, возможны два случая:

1) система не находится в расчетных режимных условиях, тогда регуляторы, открываясь, будут увеличивать расход, который в итоге может привести к разрегулировке системы, если своевременно не повысить температуру теплоносителя на источнике;

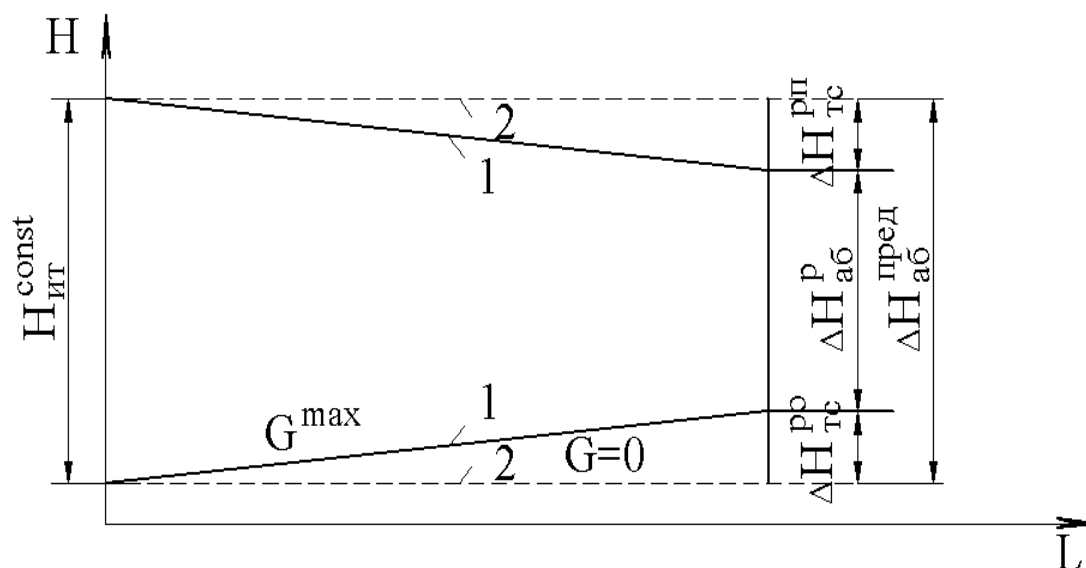
2) система находится в расчетных режимных условиях, $(t_{\text{но}}^p, Q^{\text{max}})$: в этом случае регуляторы будут открываться, выберутся все гидравлические запасы, и начнется разрегулировка системы. При больших возмущениях во избежание полного разрегулирования необходимо центральное управление режимом ТСС, что возможно при «управляемости» ТСС.

Значительную эффективность в надежность теплоснабжения вносит гидравлическая устойчивость ТСС, закладываемая при проектировании.

6.2 Гидравлическая устойчивость ТСС

ТС разделим на две части: собственно тепловая сеть (от ИТ до теплового пункта потребителя) и тепловые пункты потребителей с их разводящими сетями.

Пьезометрический график сети для предельных режимов с одной абонентской установкой показан на рисунке 6.1.



- 1 – пьезометры в падающей и обратной линиях при G^{\max} ;
 2 – пьезометры при $G = 0$; $N_{\text{ИТ}}$ – напор на выходных коллекторах источника;
 $\Delta N_{\text{тс}}^{\text{рп}}$, $\Delta N_{\text{тс}}^{\text{ро}}$, $\Delta N_{\text{аб}}^{\text{р}}$ – потери напора расчетные в подающей линии,
 обратной линии и у абонента; $\Delta N_{\text{аб}}^{\text{пред}}$ – предельный напор у абонента

Рисунок 6.1 – Пьезометрический график тепловой сети

Располагаемый напор на коллекторе ИТ ($\Delta N_{\text{ИТ}}$) принимаем постоянным. Соответственно, этот напор теряется в тепловых сетях ($\Delta N_{\text{тс}}$) и у потребителей ($\Delta N_{\text{аб}}$), включая ТП:

$$\Delta N_{\text{ИТ}} = \Delta N_{\text{тс}} + \Delta N_{\text{аб}} .$$

В пределе можно представить два крайних гидравлических режима тепловых сетей: при максимальном расходе теплоносителя G^{\max} и нулевом расходе $G = 0$. Соответственно этим режимам и потери напора в ТС будут изменяться от $\Delta N_{\text{тс}}^{\text{р}}$ до нулевых.

При нулевом расходе $G = 0$ (абонент отключен) у абонента будет предельно большой разрыв пьезометров равный

$$\Delta N_{\text{аб}}^{\text{пред}} = \Delta N_{\text{тс}}^{\text{р}} + \Delta N_{\text{аб}}^{\text{р}} = \Delta N_{\text{тс}}^{\text{рп}} + \Delta N_{\text{тс}}^{\text{ро}} + \Delta N_{\text{аб}}^{\text{р}} .$$

Под гидравлической устойчивостью понимается способность ТСС сохранять стабильную работу систем потребления тепла, то есть обеспечивать малые

отклонения в расходах теплоносителя в этих системах при изменении расходов в ТС.

Количественно устойчивость ТСС оценивается коэффициентом гидравлической устойчивости:

$$K = \frac{\Delta H_{аб}^p}{\Delta H_{тс}^p + \Delta H_{аб}^p}. \quad (6.1)$$

Определим колебания расхода теплоносителя у абонентов, не оснащенных автоматикой. Относительные расходы у абонентов и в тепловой сети при изменении режима потребления обозначим:

$$x_{аб} = \frac{G_{аб}}{G_{аб}^p}; \quad x_{тс} = \frac{G_{тс}}{G_{тс}^p},$$

где $G_{аб}$ и $G_{тс}$ – расходы теплоносителя в нерасчетном режиме.

Расход в трубопроводных системах равен корню квадратному из располагаемого напора, то есть

$$x_{аб}^2 = \frac{\Delta H_{аб}}{\Delta H_{аб}^p}; \quad x_{тс}^2 = \frac{\Delta H_{тс}}{\Delta H_{тс}^p}.$$

Подставляя значения $x_{аб}$ и $x_{тс}$, выраженные через значения напоров, определим $x_{аб}$

$$x_{аб} = \sqrt{\frac{1 - x_{тс}^2 \cdot (1 - K)}{K}}. \quad (6.2)$$

Зависимость (6.2) дает возможность определить изменение расхода теплоносителя у абонента при изменении расхода в тепловых сетях.

Для примера выполним расчет при $n_{тс}^p = 100$ м.в.с; $n_{аб}^p = 20$ м.в.с.

Значение $K = 20/(100 + 20) = 0,167$.

Предположим, что расход в ТС уменьшился на 5 % то есть $x_{тс} = 0,95$, тогда

$$x_{аб} = \sqrt{\frac{1 - 0,902 \cdot (1 - 0,167)}{0,167}} = 1,22.$$

Из этого следует, что расход у абонента увеличится на 22 %, то есть имеем перерасход теплоты.

Системы теплоснабжения проектируют на максимальные нагрузки, а режимные возмущения сводятся к уменьшению расхода в ТС в виду уменьшения потребления тепла какими-то потребителями (режимные сокращения, отключения, аварии и т.п.). В этом случае при $N_{ит} = const$ увеличивается располагаемый напор у остальных потребителей, что приводит к перерасходу тепла у абонентов, не имеющих автоматизированных вводов.

Гидравлическую устойчивость ТСС можно повысить двумя основными способами:

1) уменьшить потери напора в ТС $\Delta H_{тс}$ за счет увеличения диаметров в магистральных сетях;

2) увеличить потери напора у абонентов $\Delta H_{аб}$ (распределительных сетях) за счет снижения диаметров или дополнительного дросселирования.

Эти предложения видны из формулы (6.1), а так же реализуются в рекомендациях по выбору удельного сопротивления $R_{л}$: для магистральных сетей $R_{л} \approx 80$ Па/м; для распределительных сетей $R_{л} \approx 150 \div 250$ Па/м.

Контрольные вопросы

1. Задачи управления режимами ТСС.
2. Причины нарушения гидравлической устойчивости ТСС.
3. Гидравлическая устойчивость ТСС.
4. Основные способы обеспечения гидравлической устойчивости ТСС.

7 Показатель качества функционирования тепловых сетей

7.1 Оценка надежности системы тепловых сетей

ТСС относятся к сложным техническим системам жизнеобеспечения, поэтому их надежность оценивают показателем качества функционирования. Состояние системы в любой момент времени t определяется состоянием работоспособности всех элементов. При определенном наборе исправных элементов система будет работоспособна; при определенном наборе неисправных элементов система будет полностью в отказовом состоянии.

Между указанными крайними состояниями возможны состояния с частичной работоспособностью системы.

Переход системы из одного состояния в другое связан с отказами или восстановлениями ее элементов. Состояние системы описывается вектором $\bar{x}(t)$, отражающим состояние элементов:

$$\bar{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1(t) \\ \dots \\ x_n(t) \end{pmatrix},$$

где $x_i(t)$ – состояние i -го элемента; n – число элементов.

Принимая, что каждый элемент может быть в двух состояниях – работоспособном и неработоспособном, значение $x_i(t)$:

$$x_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если элемент работоспособен,} \\ 0, & \text{если элемент неработоспособен.} \end{cases}$$

За характеристику качества функционирования ТСС принимается степень выполнения графика расхода теплоты. Каждому состоянию системы $\bar{x}(t)$ соответствует расход теплоты $Q_x(t)$. Величины $\bar{x}(t)$ и $Q_x(t)$ изменяются случайным образом.

С учетом того, что самые напряженные аварийные ситуации возникают в период стояния расчетных или близких к ним наружных температур, наиболее объективно оценивать надежность ТСС по обеспечению расчетного расхода теплоты всей системой. Поэтому за показатель качества функционирования системы принимается математическое ожидание случайной функции $Q_x(t)$

$$Q(t) = M[Q_x(t)].$$

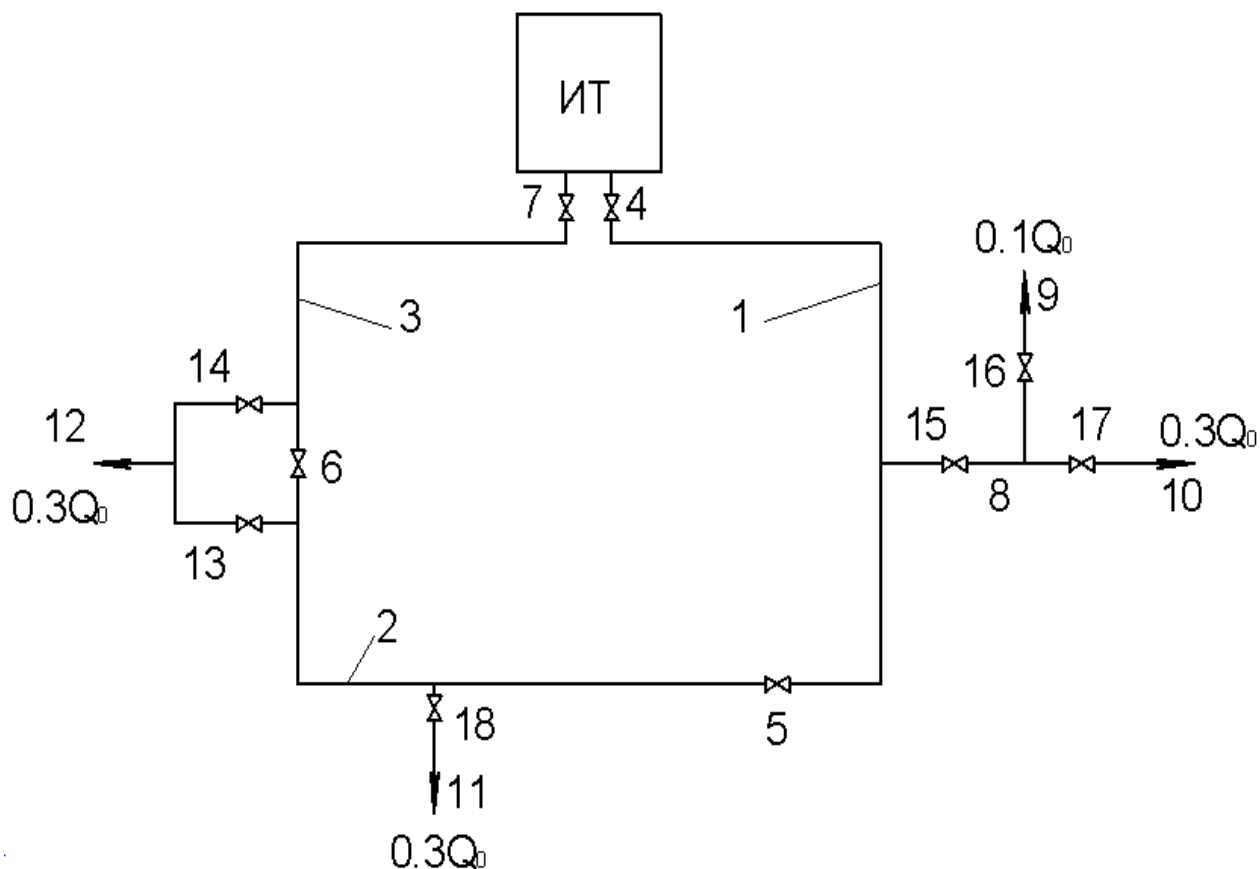
Показатель надежности ТСС $R_{ст}(t)$ определяется как отношение показателя качества функционирования реальной системы к показателю качества функционирования идеальной (исправной) системы $Q_{и}(t)$

$$R_{ст}(t) = \frac{Q(t)}{Q_{и}(t)}.$$

Для получения уравнений для расчета показателя надежности рассмотрим пример расчета схемы тепловой сети, приведенной на рисунке 7.1.

Оценка $R_{ст}(t)$ только при расчетной температуре наружного воздуха уже сточает требования к ПН ТСС, что можно отнести к резервированию.

Назначение секционирующих и отсекающих задвижек видно из их положения в схеме. Расчетные значения узловых тепловых нагрузок в долях от суммарной нагрузке ИТ приведены на рисунке.



1-3 – участки кольцевой схемы; 4-7 – секционирующие задвижки;
8-12 – тупиковые ответвления и подводы к абонентам; 13-17 – задвижки на ответвлениях

Рисунок 7.1 – Схема тепловой сети

При отказе какого-либо элемента, его отключают и ремонтируют, соответственно отключают определенных потребителей, и система переходит в отказовое состояние.

В приведенной схеме ТСС имеется 18 элементов, что делает расчет достаточно сложным (число состояний системы будет равно 2^{18}). Поэтому для любой схемы предварительно целесообразно провести эквивалентирование. Оно проводится путем объединения элементов, соединенных по надежности (последовательно). Для каждого эквивалентного элемента устанавливаются значения параметра потоков отказов ω_i и мощность отключаемых потребителей ΔQ_i при его отказе.

Рассмотрим процесс эквивалентирования более подробно по схеме (рисунок 7.1).

Отказ головной задвижки 4 вызывает необходимость закрытия задвижки 5. При этом отключаются потребители 9 и 10. К этому же результату приводят отказы: участка кольцевой сети 1, участка ответвления 8 и задвижек 15, 16 и 17. Следовательно, по надежности все эти элементы соединены последовательно и

могут рассматриваться как один эквивалентный элемент 19 с параметром потока отказов $\omega_{19} = \omega_4 + \omega_1 + \omega_8 + \omega_{15} + \omega_{16} + \omega_{17}$. Отключаемая мощность при этом (цена отказа) равна $\Delta Q_{19} = 0,1Q_0 + 0,3Q_0 = 0,4Q_0$.

Ответвления 9 и 10 не имеют последовательных элементов, поэтому они учитываются отдельно и их показатели остаются без изменения, то есть ω_9 и ω_{10} ; $\Delta Q_9 = 0,1Q_0$; $\Delta Q_{10} = 0,3Q_0$.

Отказ задвижки 5 приводит к необходимости закрытия задвижки 4 и 6 и отключения потребителей 9, 10 и 11. Элемент 5 не имеет последовательно соединенных элементов, поэтому для него: ω_5 , $\Delta Q_5 = 0,1Q_0 + 0,3Q_0 + 0,3Q_0 = 0,7Q_0$.

Отключение потребителя 11 приводят отказы участка 2, задвижки 18 и ответвления 11, которые можно привести к одному эквивалентному элементу 20: $\omega_{20} = \omega_2 + \omega_{18} + \omega_{11}$; $\Delta Q_{20} = 0,3Q_0$.

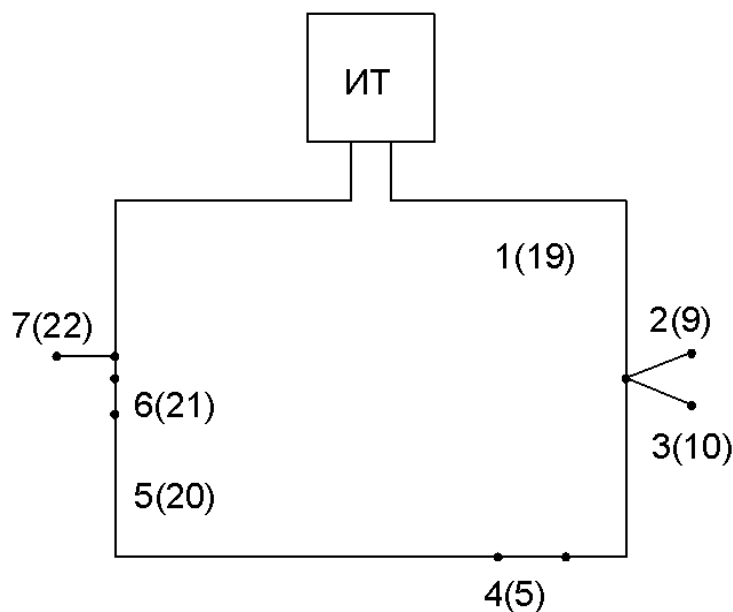
Потребитель 12 при отказе элемента 2 не отключается, так как за счет резервирования задвижек 13 и 14 обеспечивается подача тепла через магистраль 3.

При отказе задвижки 6 закрывают задвижки 7 и 5 и отключают потребителей 11 и 12. Последовательно соединенной с задвижкой 6 является задвижка 13. Отсюда, эквивалентный элемент 21 характеризуется: $\omega_{21} = \omega_6 + \omega_{13}$; $\Delta Q_{21} = 0,3Q_0 + 0,3Q_0 = 0,6Q_0$.

К отключению потребителя 12 приводит отказ задвижки 14 и ответвления 12. Следовательно, эквивалентный элемент 22 характеризуется: $\omega_{22} = \omega_{14} + \omega_{12}$; $\Delta Q_{22} = 0,3Q_0$.

Отказы задвижки 7 и участка 3 к отключениям потребителей не приводят, поэтому эти элементы из расчета исключаются.

В результате схема включает эквивалентные элементы: 19, 9, 10, 5, 20, 21, 22, то есть всего семь элементов вместо восемнадцати (рисунок 7.2).



1-7 – новая нумерация элементов; (19) – нумерация эквивалентных элементов

Рисунок 7.2 – Эквивалентированная схема тепловой сети

Проведя перенумерацию эквивалентных элементов (для удобства пользования), составим таблицу состояний ТСС $\bar{x} = \|\bar{x}_i\|$ (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Состояние ТСС

Номер состояния ТСС	Вектор состояний	Состав работоспособных элементов	Характеристика качества функционирования
0	$\bar{x}_0 = (1111111)$	1, 2, 3, 4, 5, 6	Q_0
1	$\bar{x}_1 = (0111111)$	2, 3, 4, 5, 6, 7	$0,6Q_0$
2	$\bar{x}_2 = (1011111)$	1, 3, 4, 5, 6, 7	$0,9Q_0$
3	$\bar{x}_3 = (1101111)$	1, 2, 4, 5, 6, 7	$0,7Q_0$
4	$\bar{x}_4 = (1110111)$	1, 2, 3, 5, 6, 7	$0,3Q_0$
5	$\bar{x}_5 = (1111011)$	1, 2, 3, 4, 6, 7	$0,7Q_0$
6	$\bar{x}_6 = (1111101)$	1, 2, 3, 4, 5, 7	$0,4Q_0$
7	$\bar{x}_7 = (1111110)$	1, 2, 3, 4, 5, 6	$0,7Q_0$

Переходы системы из исправного состояния \bar{x}_0 в отказовое характеризуется значениями параметров потока отказов $\omega_j (j=1, n)$.

Вероятность перехода из ξ -го в k -е состояние (в состояние отказа) равна

$$P_{\xi k} = \omega_i \cdot d \cdot t = \omega_{\xi k} \cdot dt .$$

Вероятность остаться в исправном состоянии

$$P_{\xi\xi} = 1 - \sum_{\xi \neq k} \omega_{\xi k} \cdot dt .$$

Нормирующее условие

$$\sum P_{\xi k} = 1 .$$

Зная вероятности состояний элементов в момент t , выведем выражение для вероятности состояний системы в момент $(t + dt)$.

В момент $t+dt$ система может находиться в исправном состоянии и в состоянии отказа. В исправном состоянии она будет находиться в том случае, если в момент t была исправна, и за время dt не произошло отказа, то есть

$$P_{\xi}(t + dt) = P_{\xi}(t) \cdot \left(1 - \sum_{\xi \neq k} \omega_{\xi k} \cdot dt \right) . \quad (7.1)$$

В состоянии отказа система в момент $t+dt$ может находиться в двух случаях: а) если в момент t была исправна и за dt перешла в отказовое состояние; б) в момент t была в состоянии отказа и за dt не вышла из него

$$P_k(t + dt) = \sum_{\xi \neq k} P_{\xi}(t) \cdot \omega_{\xi k} + P_k(t) .$$

Составив $k = 1, n$ уравнений для отказовых состояний с учетом равенства (7.1), получим систему $(n + 1)$ уравнений для всех состояний системы.

Для рассмотренного примера система уравнений состояний ТСС в первых производных $\frac{P}{dt}(t + dt)$:

$$P_0'(t) = -P_0(t) \cdot (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5 + \omega_6 + \omega_7);$$

$$P_1'(t) = P_0(t) \cdot \omega_1; \quad P_2'(t) = P_0(t) \cdot \omega_2;$$

$$P_3'(t) = P_0(t) \cdot \omega_3; \quad P_4'(t) = P_0(t) \cdot \omega_4;$$

$$P_5'(t) = P_0(t) \cdot \omega_5; \quad P_6'(t) = P_0(t) \cdot \omega_6;$$

$$P_7'(t) = P_0(t) \cdot \omega_7.$$

Решением системы уравнений будет:

$$P_0(t) = e^{-\sum \omega_i t}; \quad P_k(t) = \frac{\omega_k}{\sum \omega_i} \cdot (1 - e^{-\sum \omega_i t}), \quad k=1, n.$$

При условии $\sum P_i(t) = 1$.

Математическое ожидание характеристики качества функционирования системы

$$Q(t) = M[Q_x(t)] = \sum P_j \cdot Q_{oj}(t) = Q_0 \cdot e^{-\sum \omega_j t} + \sum_{j=1}^1 Q_{oj} \cdot \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} \cdot (1 - e^{-\sum \omega_j t}),$$

где j – индекс эквивалентного элемента.

Соответственно, выражение для основного показателя надежности функционирования тепловых сетей примет вид:

$$R_{cr}(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - \sum_{j=1}^J \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \cdot \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} \cdot (1 - e^{-\sum \omega_j t}).$$

Следует особо отметить, что $R_{cr}(t)$ получен в предположении недопустимости отказов, то есть он оценивает только вероятность возникновения отказа и цену отказа – неподачу расчетного расхода тепла потребителям. Глубину отказа, его развитие во времени, время ремонта и восстановления учитываются дополнительными показателями надежности и будут рассмотрены далее.

7.2 Анализ показателя надежности $R_{cr}(t)$

Основной показатель надежности $R_{cr}(t)$, выраженный через математическое ожидание отключаемой мощности $M|_{\Delta} Q_j$, определяется по выражению:

$$R_{cr}(t) = 1 - \sum_{j=1}^{i=J} \frac{\Delta Q_j}{Q_0} \cdot \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} \cdot (1 - e^{-\sum \omega_j t}) = 1 - \frac{M|_{\Delta} Q_j}{Q_0}.$$

Из данного уравнения можно сделать вывод, что $R_{cr}(t)$ зависит от следующих факторов:

- 1) значения параметров потоков отказов элементов ω_j ;
- 2) количества учитываемых в расчетах аварийных ситуаций l ;
- 3) длительности расчетного периода t ;
- 4) величины отключаемых мощностей ΔQ_j .

Рассмотрим влияние каждого из факторов на $R_{cr}(t)$.

Параметр потока отказов ω_j . Обычно величина ω_j определяется на основании ретроспективного анализа, но учитывая, что при проектировании и реконструкции сетей принимаются наиболее прогрессивные конструкции элементов ТСС, необходимо проведение коррекции значения ω_j .

При расчете $R_{ст}(t)$ величины ω_j являются заданными, и задача расчетчиков (проектировщиков) – оценить правильность и точность числовых значений ω_j , принимаемых в расчетах с учетом прогрессивных технологий изготовления и монтажа.

Количество учитываемых в расчетах аварийных ситуаций l и величина отключаемых при этом тепловых мощностей. Эти параметры взаимосвязаны, но имеют специфические особенности. Число l зависит от числа элементов ТСС. Но вероятность отказа и отключаемая мощность при отказах некоторых элементов могут быть столь незначительными, что можно некоторые аварийные ситуации исключить из расчетов. Не рассматриваются также элементы, отказы которых не приводят к отключению потребителей. Для снижения потерь теплоносителя и числа отключаемых потребителей (мощности) при отказах магистральных сетей устанавливаются секционирующие задвижки. Это приводит к увеличению числа элементов, что необходимо учитывать при составлении расчетной схемы. Секционирование тепловой сети приводит к различному эффекту для не резервированной и резервированной ее частей. Секционирование разветвленной тупиковой сети позволяет сократить величину отключаемой мощности при отказах после секционирующей задвижки, что является практически единственным способом резервирования тупиковых систем.

На кольцевой части сети секционирование и дублированное подключение ответвлений могут исключить или значительно снизить величину отключаемой мощности ΔQ_j при отказах элементов ТС. Положительный вклад в повышение надежности СТ секционированием подтверждается еще тем, что параметр потока отказов задвижек примерно на два порядка меньше, чем параметр потока отказов участка теплопроводов. Оптимальное секционирование – один из основных путей повышения надежности тепловых сетей.

Длительность отопительного периода. За расчетное время принимается длительность отопительного периода. Это положение принимается из условия, что в отопительный период существуют все виды тепловых нагрузок, а в неотопительном – только ГВС. Также в летний период выполняются планово-восстановительные ремонты и испытание сетей.

В соответствии с особенностями определяющих факторов можно определить возможности повышения надежности ТСС:

1) увеличение степени секционирования тепловой сети, что уменьшает величину отключаемой мощности ΔQ_j при авариях и тем самым повышает $R_{ст}(t)$. Это средство требует наименьших капиталовложений и потому должно быть использовано в первую очередь;

2) применение дублированного присоединения ответвлений к кольцевой части сети. Оно отразится на числе учитываемых отказовых ситуаций l ;

3) наиболее радикальным, но и наиболее дорогостоящим способом является увеличение резервированной (кольцевой) части ТС за счет сокращения нерезервированной части. Этот способ применяют в последнюю очередь, и он требует перепроектирования системы.

В данном разделе не рассматривались такие элементы ТСС как источники теплоты и насосные станции. При учете ИТ и НС кроме надежности элементов этих установок необходимо учитывать надежность подачи энергии, топлива и воды в ТСС. Вероятности отказов и величины отключаемых мощностей ИТ и НС включаются в уравнение для расчета основного показателя надежности функционирования ТСС.

Контрольные вопросы

1. Методика оценки надежности ТСС.
2. Характеристика показателя надежности $R_{ст}(t)$.
3. Смысл и назначение эквивалентирования расчетной схемы.
4. Определение параметра потока отказов и цена отказа эквивалентного элемента.
5. Оценка вероятностей состояний системы за время Δt .

8 Расчет транспортного резерва тепловых сетей

8.1 Показатели лимитированного теплоснабжения

Кроме основного показателя эффективности $R_{ст}(t)$, который определяет вероятность теплоснабжения потребителей, для оценки надежности ТС применяется показатель $K_{л}$ – детерминированный показатель лимитированного теплоснабжения. Если $R_{ст}(t)$ определяется структурой, резервом и вероятностью отказов элементов ТС, то $K_{л}$ характеризуется обеспечением необходимой пропускной способности закольцованных сетей при аварийных ситуациях.

Показатель $K_{л}$ характеризует степень снижения температуры воздуха внутри помещения на конец аварийной ситуации (за период ремонта отказавшего элемента). Температура внутри здания определяется режимом теплоснабжения, аккумулярующей способностью здания, температурой наружного воздуха и длительностью ремонта. Для тупиковых ТС подача тепла в здания при аварийных ситуациях прекращается полностью ($Q = 0$), и для данных ТС коэффициент $K_{л}$ определяется временем ремонта и аккумулярующей способностью здания.

В действительности параметры, определяющие значение $K_{л}$, имеют вероятностный характер, но для экстремальных (расчетных) условий можно величину $K_{л}$ принимать детерминированной.

Для неотключаемых от тепловой сети при авариях потребителей дополнительно применяются следующие ПН:

- 1) показатель лимитированной подачи теплоты конкретному i -му потребителю;
- 2) показатель, определяющий частоту попадания потребителя на лимитированное теплоснабжения, имеет вероятностный характер, отражающий вероятность совпадения двух событий: отказ элемента кольцевой сети, наличие температуры наружного воздуха равной или ниже расчетной.

Для отключаемых от ТС потребителей при аварийных отказах применяют также два дополнительных показателя надежности:

- 1) детерминированный показатель при $K_{л} = 0$, отражающий соотношение остывание здания до недопустимого состояния и временем ремонта отказавшего элемента;
- 2) вероятностный показатель, определяющий частоту попадания наиболее удаленного потребителя в состояние, когда отключено теплоснабжение.

8.2 Лимитированное теплоснабжение

При отказе элементов в кольцевой части ТС возникает гидравлическая разрегулируемость сетей. Если ТС неуправляемые, то ближайшие к ИТ потребители могут получить достаточное или больше расчетного количество тепла, а отдаленные могут вообще не получить тепло, не будучи отключенными от ТС. Во избежание такой ситуации ТС должна быть управляемой.

Управляемой системой в аварийных ситуациях называется структура, когда с помощью специальных устройств (регуляторов) можно установить лимитированную подачу тепла всем потребителям.

Соответственно, первоначально устанавливаются лимиты теплоты для потребителей с учетом, что температура внутри помещения за время ремонта не снизится ниже температуры конденсации влаги воздуха $t_b^{\text{мин}}$. Величина этой температуры для зданий различного назначения может несколько отличаться. При расчетах лимитированного теплоснабжения района города можно принять $t_b^{\text{мин}} = 12$ °С. При наличии в районе зданий с разной теплоаккумулирующей способностью выбирают типовое здание этого района.

По упрощенной методике температура воздуха внутри помещения при снижении подачи теплоты определяется

$$t_b'' = t_n + \frac{Q}{q_0 V} + \frac{t_b' - t_n - \frac{Q}{q_0 V}}{e^{-\frac{Z}{\beta}}}, \quad (8.1)$$

где t_b'' – температура воздуха внутри помещения, которая установится через Z , ч, после нарушения нормального теплового режима, °С; t_n – температура наружного воздуха, °С; Q – расчетный расход тепла, поступающего в помещение, Вт; q_0 – удельная тепловая характеристика здания, Вт/(м³·°С); V – объем здания по наружному обмеру, м³; t_b' – температура воздуха в помещении в момент нарушения теплового режима, °С; Z – время остывания, ч; β – коэффициент аккумуляции, ч.

Для жилых зданий $\beta = 30-45$ ч, а для зданий с повышенной теплоизоляцией – $\beta \approx 55-60$ ч.

Решив совместно уравнение (8.1) с уравнением $K_{л} = Q_{л}/Q_p$, можно определить температуру внутри помещения с учетом заданного значения $K_{л}$:

$$\frac{t_b'' - t_n}{t_p^b - t_n^p} = K_{л} + \left(\frac{t_b' - t_n}{t_p^b - t_n^p} - K_{л} \right) \cdot e^{-\frac{Z}{\beta}}.$$

Для зданий полностью отключаемых от ТС, когда $K_{л} = 0$

$$t_b'' = t_n + (t_b' - t_n) \cdot e^{-\frac{Z}{\beta}}.$$

При заданной длительности ремонта и t_b''

$$K_{л} = \frac{(t_b'' - t_n) - (t_b' - t_n) \cdot e^{-\frac{Z}{\beta}}}{(t_p^b - t_n^p) \cdot (1 - e^{-\frac{Z}{\beta}})}.$$

Если анализ остывания воздуха проводить при расчетной температуре наружного воздуха, то есть $t_n = t_n^p$, то зависимость для $K_{л}$ примет вид:

$$K_{л} = \frac{(t_{в}'' - t_{н}^p)/(t_{в}^p - t_{н}^p) - e^{-\frac{Z}{\beta}}}{1 - e^{-\frac{Z}{\beta}}}$$

Далее, задаваясь $K_{л}$ и Z , определяют значение $t_{в}''$ (таблица 8.1).

Таблица 8.1 – Температура внутри помещения к концу охлаждения Z

$K_{ло}$	Значение $t_{в}$, °С, при Z , ч							
	0	1	5	10	15	20	25	30
0,6	18	17,66	15,98	14,2	12,62	11,23	10,0	4,2
0,7	18	17,68	16,48	15,15	14,0	12,92	12	8,92

Для приведенных условий при $K_{л} = 0,6$ $t_{в} = 12$ °С достигается через 17 ч, а при $K_{л} = 0,7$ – через 25 ч ремонта элемента кольцевой части сети. При увеличении проведения ремонта на 8 часов – довольно большое время (25 ч – 17 ч = 8 ч), но обеспечение $K_{л} = 0,7$ потребует дополнительного капиталовложения в ТС (увеличение пропускной способности \approx на 10%).

В общем случае, расчет $K_{л}$ при нормативном уровне снижения $t_{в}$ представляет собой комплексную оптимизационную задачу при совместном рассмотрении вопросов:

- 1) обоснование для данного района представительного здания;
- 2) установление времени ремонта головных элементов ТСС в зависимости от степени оснащения АВС;
- 3) расчет дополнительных расходов в транспортное резервирование при различных $K_{л}$;
- 4) оптимизация расходов и диаметров труб при различном времени ремонта элементов $t_{в}$ и значении $K_{л}$.

Обеспечение лимитированного теплоснабжения возможно за счет снижения температуры сетевой воды в подающем трубопроводе τ_1 при подмешивании обратной, при этом расход теплоносителя остается расчетным.

Возможен вариант, когда расход воды увеличивается при некотором снижении τ_1 (за счет подмешивания). Но в данном случае необходимо обеспечить заполняемость сетей и абонентских установок, не допуская завоздушивания. Это возможно обеспечить только при наличии районных тепловых пунктов (РТП) на ответвленных от закольцованного участка ТС.

Расчет температурного режима ТС и режима остывания здания приведены в [1, 2].

Контрольные вопросы

1. Смысл понятия «лимитированное теплоснабжение».
2. Зачем определяется показатель $K_{ло}$ для тупиковых тепловых сетей?
3. Способы обеспечения $K_{ло}$.

9 Методика расчета надежности нерезервированных тепловых сетей

Структура разветвленной тупиковой сети представляет собой «дерево», состоящее из ствола в виде цепочки последовательно соединенных элементов и ветвей. Все ветви распределяются в последовательности их значимости. Участки сети - ствол и ветви по надежности не равноценны. К полному отказу ТС приводят отказы элементов головного участка. Отказы других элементов приводят к частичным отказам ТС разного уровня.

Критерием для построения дерева сети при расчете надежности принимается вклад в ненадежность ТС отдельным участком. Вклад в ненадежность ТС определяется выражением

$$k_{ij} = Q_{rij} \cdot 2l_{ij} \cdot \omega_{rij}, \quad (9.1)$$

где i, j – номера точек начала и конца участка; Q_{rij} – расчетная теплопроизводительность, отключаемая при отказе ij -го участка; ω_{rij} – параметр потока отказов трубопровода на данном участке.

Если принять, что ω_T не зависит от диаметра, то выражение (9.1) имеет вид:

$$k_{ij} = Q_{rij} \cdot 2l_{ij}.$$

Построение сети по приоритету вклада в ненадежность ТС выполняется в следующей последовательности. В связи с тем, что для тупиковой ТС возможно два способа подвода теплоносителя: от закольцованной магистрали от ЦТП и от собственного источника теплоты. За первый участок ствола принимают участок от ЦТП или участок от ИТ. В дальнейшем принципиального различия в построении структуры ТС практически нет.

К головному участку 12 ствола (1 – начало, 2 – конец) в узле 2 возможно подключение нескольких ответвлений. В ствол сети включается участок с наибольшим значением $k = Q_p 2l$. Конечному узлу второго участка присваивается номер 3. Для ответвлений из узла 3 производят аналогичные сравнения по величине k и выбирают участок 34 (третий участок ствола). Перебирая все участки ТС, определяют ствол дерева.

Выбор ствола структуры ТС во многом совпадает с выбором расчетной (главной) магистрали при гидравлическом расчете ТС.

Далее по величине k анализируют все ответвления от узлов ствола с соответствующим присвоением номеров узлам на ответвлениях.

Расчет показателя надежности тупиковой разветвленной сети ведут в следующей последовательности.

1. Для всех элементов ТС определяют значения параметров потока отказов. Далее нумеруют узлы участков, располагая их по приоритету, и получают структуру ТС в виде дерева. При этом задвижкам присваивают номер участка, на котором она установлена, но с буквой А. Например: на участке 34 арматура А34. Концевой задвижке перед абонентской установкой присваивается номер узла потребления – А7, А8.

2. Разрабатывают эквивалентную схему путем объединения элементов, соединенных по надежности последовательно, то есть объединяют в один экви-

валентированный элемент оборудования, отказы которых приводят к отключению одних и тех же потребителей.

Для ремонта эквивалентированного элемента перекрываются секционирующие задвижки ствола ТС, но эти задвижки не включаются в эквивалентированный элемент, задвижки на выходе из участка – включаются.

Для каждого j -го эквивалентированного элемента определяется параметр потока отказов

$$\omega_j = \sum_{i=1}^k \omega_i,$$

где k – число элементов, включенных в эквивалентированный элемент; ω_i – параметр потока отказов i -го элемента.

3. Определяют отключаемую тепловую мощность при отказе j -го эквивалентированного элемента ΔQ_j .

4. Вычисляют среднее значение вероятности отказа системы за расчетное время t

$$F(t) = 1 - \exp \left(- \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot t \right),$$

где N – число эквивалентированных элементов.

5. Рассчитывают математическое ожидание отключаемой тепловой мощности в аварийных ситуациях

$$M |\Delta Q_j| = \sum_{j=1}^N \Delta Q_j \cdot \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} \cdot \left[1 - \exp \left(- \sum_{j=1}^N \omega_j \cdot t \right) \right].$$

6. Определяют показатель надежности ТС:

$$R_{cr}(t) = 1 - \frac{M |\Delta Q_j|}{Q_0}.$$

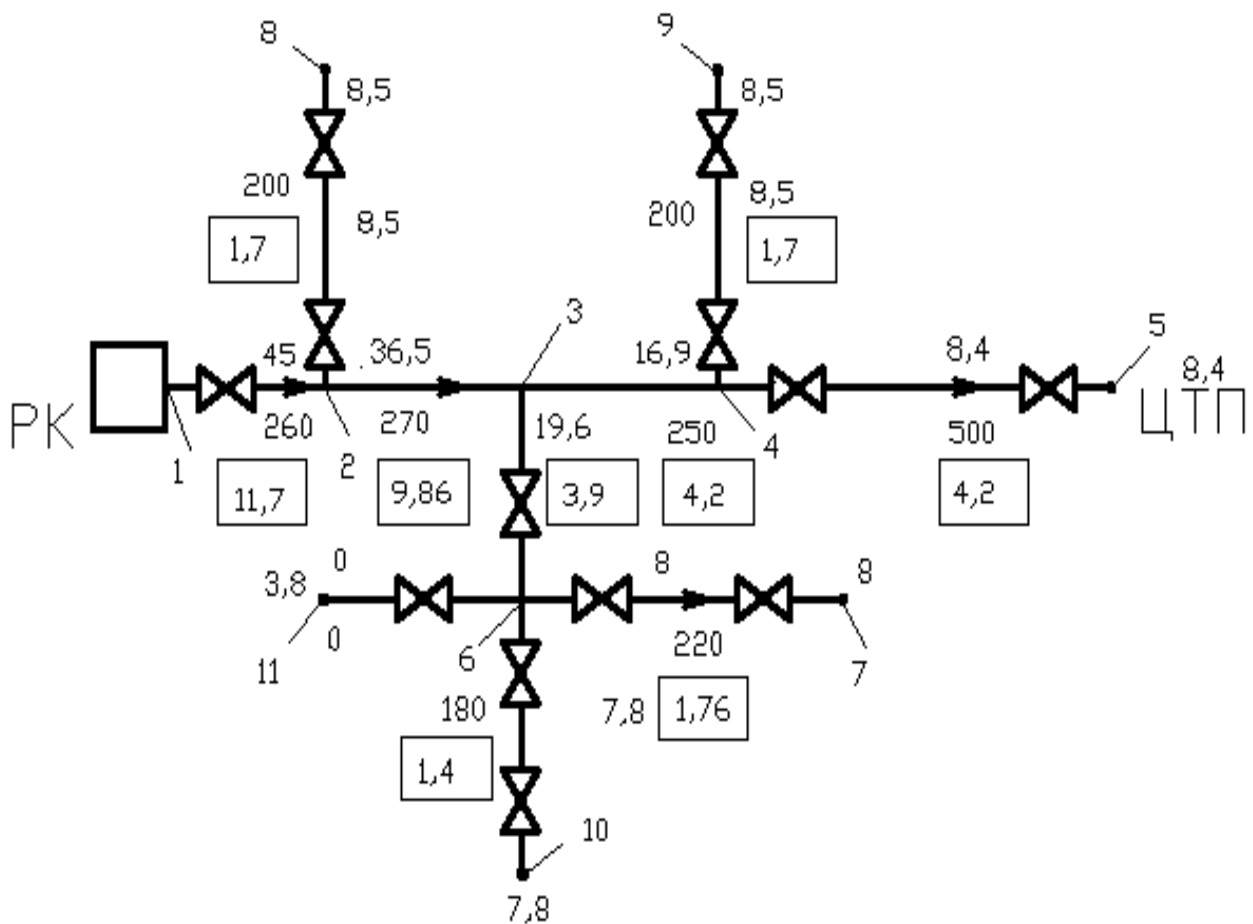
Показатель $R_{cr}(t)$ – нормированная величина: $R_{cr}^H(t)$. При $R_{cr}(t) < R_{cr}^H(t)$ необходимо разработать мероприятия по повышению надежности ТСС.

Для уточнения оценки надежности теплоснабжения отдельных потребителей (особенно наиболее удаленных от ИТ) применяют дополнительно два показателя надежности: детерминированный и вероятностный (см. п. 8.2).

Применение методики рассмотрим на примере.

9.1 Пример расчета надежности тупиковой разветвленной тепловой сети

Исходные данные. Тепловая сеть обеспечивает теплоснабжением жилой микрорайон с плотностью тепловой нагрузки $q = 0,4$ МВт/га. Источник тепла – районная котельная тепловой мощностью 45 МВт. Схема с размерами сети, длины участков (участок 6-11 имеет длину $l = 0$) и расположение секционирующих задвижек и задвижек на ответвлениях к потребителям показаны на рисунке 9.1. Потребителями теплоты являются ЦТП.



1-11 – номера узлов сети;
 стрелками указано направление движения теплоносителя
 Рисунок 9.1 – Схема тупиковой разветвленной
 тепловой сети (в однолинейном изображении)

Все узлы пронумерованы, поэтому участки имеют двойную нумерацию 1-2; 2-3 и т.д. Задвижки на участках устанавливаются в их началах, поэтому они имеют ту же нумерацию, но с индексом А1-2, А2-3 и т.д.; задвижки перед потребителями имеют номер узла потребителя: А8, А5.

В узлах даны мощности ЦТП, МВт. В квадратах показана приоритетность участка при расчете сети на надежность $\kappa_{ij} = Q_{pij} \cdot l_{ij}$. Схема сети построена с позиций приоритетности участков.

Задвижки расставлены в соответствии с требованиями СНиП. Головной участок между задвижками А1-2 и А4-5 имеет длину 0,78 км, поэтому на этом участке секционирующая задвижка не предусмотрена.

Рассчитаем надежность схемы тепловой сети, приведенной на рисунке 7.2.

1. Разработаем эквивалентную схему тепловой сети. Первая зона включает основную задвижку А1-2; ствол сети, состоящий из участков 1-2, 2-3, 3-4 и задвижки на ответвлениях от ствола А2-8, А3-6, А4-9, А4-5. Все перечисленные элементы по надежности соединены последовательно, так как отказ любого из них приводит к необходимости отключения всей сети. Отключаемая мощность

при этом (цена отказа) равна $\Delta Q_1 = 45$ МВт. Параметр потока отказов эквивалентированного элемента

$$\omega_1 = [0,002 + 0,05 \cdot (0,26 + 0,27 + 0,25) + 0,002 \cdot 4] \cdot 2 = 0,098.$$

Вторая зона включает участок 3-6 и задвижки на участках А6-7 и А6-10. Так как участок 6-11 очень короткий и его длину в расчетах надежности приняли равной нулю, задвижку потребителя 11 включаем во вторую зону. Отказ любого из этих элементов приводит к необходимости перекрытия задвижки 3 и отключению потребителей 11, 7, 10, поэтому все они соединены последовательно. Цена отказа зоны $\Delta Q_2 = 3,8 + 8 + 7,8 = 19,6$ МВт. Параметр потока отказов равен $\omega_2 = [0,05 \cdot 0,2 + 0,002 \cdot 3] \cdot 2 = 0,032$.

Все остальные зоны – это ответвления к потребителям. В каждую из них войдет участок с отключающей задвижкой на конце. Результаты расчета сведем в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Результаты расчета надежности ответвлений

Зона	Участки и задвижки	ΔQ_j , МВт	ω_j , 1/год
3	2-8, А8	$\Delta Q_3 = 8,5$	$\omega_3 = (0,05 \cdot 0,2 + 0,002) \cdot 2 = 0,024$
4	4-9, А9	$\Delta Q_4 = 8,5$	$\omega_4 = (0,05 \cdot 0,2 + 0,002) \cdot 2 = 0,024$
5	4-5, А5	$\Delta Q_5 = 8,4$	$\omega_5 = (0,05 \cdot 0,5 + 0,002) \cdot 2 = 0,054$
6	6-10, А10	$\Delta Q_6 = 7,8$	$\omega_6 = (0,05 \cdot 0,18 + 0,002) \cdot 2 = 0,022$
7	6-7, А7	$\Delta Q_7 = 8$	$\omega_7 = (0,05 \cdot 0,22 + 0,002) \cdot 2 = 0,026$

Определим вклад в ненадежность системы эквивалентными зонами:

$$\sum \Delta Q_j \cdot \omega_j = 45 \cdot 0,098 + 19,6 \cdot 0,032 + 8,5 \cdot 0,024 + 8,5 \cdot 0,024 + 8,4 \cdot 0,054 + 7,8 \cdot 0,022 + 8 \cdot 0,026 = 4,41 + 0,627 + 1,242 = 6,279.$$

Подробный расчет выполнен специально, чтобы оценить вклад в ненадежность системы отдельными ее элементами и отыскать, возможно, более рациональную схему секционирования сети. Как показали результаты расчета, основной вклад в ненадежность осуществляет первый эквивалентированный элемент, составляющий $(4,41/6,279) \cdot 100 = 70,2\%$. На долю ответвлений приходится $(1,242/6,279) \cdot 100 = 19,8\%$.

На ответвлениях установлен минимум отключающих устройств, поэтому изменить их число нельзя. Уменьшить вклад в ненадежность системы второй эквивалентной зоной схемными решениями нельзя, так как в этой зоне установлен необходимый минимум задвижек, а дополнительная их установка может только повысить вклад этой зоны в ненадежность. Единственная зона – это первая, которая по существу определяет надежность всей системы, и секционирование которой может быть увеличено.

2. Рассчитаем среднюю вероятность отказа системы за отопительный период $t = 0,562$ год

$$F(0,562) = 1 - e^{-\sum_{j=1}^N \omega_j \cdot t} = 1 - e^{-0,28 \cdot 0,562} = 0,146 ;$$

$$\sum_{j=1}^N \omega_j = 0,098 + 0,032 + 0,024 + 0,024 + 0,054 + 0,022 + 0,026 = 0,28.$$

3. Вычислим математическое ожидание отключаемой тепловой мощности в аварийных ситуациях

$$M|\Delta Q_j| = \sum_{j=1}^N \Delta Q_j \cdot \frac{\omega_j}{\sum \omega_j} \cdot \left(1 - e^{-\sum_{j=1}^N \omega_j}\right) = \frac{0,1456}{0,28} \cdot \sum_{j=1}^N \Delta Q_j \cdot \omega_j = \frac{0,1456}{0,28} \cdot 6,279 = 3,265.$$

4. Рассчитаем показатель надежности тупиковой разветвленной тепловой сети $R_{с.т}(0,562) = 1 - 3,265/45 = 0,9274$

Полученный невысокий показатель связан с большим вкладом в ненадежность первой зоной тепловой сети.

Для выявления возможности повышения надежности секционированием рассчитаем еще два варианта этой сети. На рисунке 9.1 против каждого участка проставлен его приоритет с позиций оценки надежности. Так, участки 1-2, 2-3, 3-4, имеющие соответственно приоритеты 11,7; 9,86 и 4,2 не секционированы, они соединены последовательно, то есть эквивалентны одному участку с приоритетом 25,7. Следовательно, любые отказы на участке этого ствола имеют большое значение для снижения надежности системы. Эти участки необходимо секционировать. Прежде всего, целесообразно поставить секционирующую задвижку в начале участка 3-4, тогда все отказы на сети после точки 3 не будут сказываться на потребителях, присоединенных к сети до точки 3, а их большинство. Можно также поставить задвижку на участке 2-3. Рассмотрим эти два варианта.

1. При наличии дополнительной задвижки А3-4 изменятся только надежность характеристики первой зоны, так как она разделится на две: 9 и 10. Зона 9 включает участки 1-2, 2-3, задвижки А1-2, А2-8, А3-6, А3-4.

$$\Delta Q_9 = 45; \quad \omega_9 = [0,05 \cdot (0,26 + 0,27) + 0,002 \cdot 4] \cdot 2 = 0,069.$$

Зона 10 включает участок 3-4 задвижки А4-9, А4-5.

$$\Delta Q_{10} = 16,9; \quad \omega_{10} = 0,033.$$

Вклад в ненадежность систем теплоснабжения

$$\sum_{с.т} \Delta Q_j \omega_j = 45 \cdot 0,069 + 16,9 \cdot 0,033 + 0,627 + 1,242 = 3,66 + 0,627 + 1,242 =$$

5,529.

Общий вклад в ненадежность снизился на 11,9 %, а ненадежность от первой зоны на 17%. Следовательно, введение одной секционирующей задвижки существенно снизило вклад в ненадежность наиболее приоритетных участков.

Рассчитаем основной показатель надежности, вводя в $\sum \omega_j$ параметр потока отказов дополнительной секционирующей задвижки А3-4. Величина $\sum \omega_j$ станет равной 0,284; $R_{с.т}(0,562) = 0,9362$, т.е. показатель надежности увеличился на 9,5%. Но это еще не окончательный результат. Если в первом варианте вероятность полного отказа системы в течение отопительного периода была равна

$$F(0,562) = 1 - e^{-0,098 \cdot 0,562} = 0,43, \text{ то во втором варианте}$$

$F(0,562) = 1 - e^{-0,069 \cdot 0,562} = 0,38$, т.е. снизилась на 11,6%, что, естественно, чрезвычайно важно. Действительно, полный отказ – это развал системы теплоснабжения целого жилого района. В рассматриваемом примере это район с населением 20-25 тыс. человек, поэтому отказы с отключением больших мощностей должны быть рассмотрены специально.

2. Для второго варианта, когда устанавливают дополнительные задвижки АЗ-4 и А2-3, получаются следующие показатели надежности: $\sum_{с.т} \Delta Q_j \omega_j = 5,425$ на 13,6 % меньше, чем в основном варианте; $R_{с.т}(t) = 0,937$, дополнительное введение задвижки А2-3 дало меньший эффект.

Расчеты показывают, что надежность тупиковых нерезервированных тепловых сетей существенно зависит от секционирования и, особенно от выделения в отдельные секции участков с большими значениями $k_{ij} = Q_{оij} \cdot l_{ij}$

Рассмотрим локальные характеристики надежности для потребителей системы теплоснабжения, изображенной на рисунке 9.1. Так как тепловая мощность районной котельной 45 МВт, поэтому головной участок тепловой сети не будет иметь диаметр более 350 мм. Как уже указывалось, такой диаметр можно считать приемлемым с позиций допустимого остывания помещений здания в течение ремонта отказавшего головного участка. Будем считать, что рассматриваемая тепловая сеть удовлетворяет требованиям детерминированного показателя надежности потребителей, присоединенных к этой РК.

Вероятностный показатель рассчитаем для крайнего потребителя по стволу сети, то есть для потребителя 5. Вероятность отказа в подаче теплоты этому потребителю определим по формуле $q_{отк} = 1 - e^{-\sum \omega_i \xi^n_{отк}}$, где ξ – коэффициент запаса по длительности стояния наружных температур $t_n \leq t_{п.о}^p$.

Примем $n_{отк} = 0,0054$ года; $\xi = 1,5$. Сумму ω_i рассчитаем по схеме на рисунке 9.1 (рассматриваем вариант, показанный на рисунке)

$\sum \omega_i = [0,002 + 0,05 \cdot (0,26 + 0,27 + 0,25 + 0,5) + 0,002 \cdot 5]^2 = 0,152$, тогда $q_{отк} = 1 - e^{-0,152 \cdot 1,5 \cdot 0,0054} = 1 - e^{-0,00123} = 0,00123$. Полученная вероятность отказа наиболее удаленного потребителя в период стояния низких наружных температур не превышает 0,01, что можно считать допустимой.

Контрольные вопросы

1. Построение «дерева отказов» тупиковой сети.
2. Критерий построения ствола «дерева отказов».
3. Последовательность расчета надежности тупиковой тепловой сети.
4. Определение $R_{с.т}(t)$ тупиковой сети.

10 Оптимальный синтез надежности ТСС

10.1 Общие положения

Оптимальный синтез надежности ТСС – задача построения надежных систем при минимально возможных затратах. Для развивающихся ТСС (в отличие от проектируемых) эта проблема заключается в их развитии и реконструкции и состоит в выборе структуры и параметров системы, изменяющихся во времени, при минимальных затратах и удовлетворении требований надежности, технических и технологических ограничений.

Математически данная задача относится к задачам систем в динамике, обладающими свойствами нелинейности, дискретности и неполноты информации. При этом полная формализация задачи и решение каким-либо одним универсальным методом принципиально невозможны. Существуют два подхода к решению задачи построения ТСС с заданным уровнем надежности: инженерный подход и более формализованный подход, базирующийся на оценке узловых ПН, с применением методов математического программирования, теории гидравлических цепей.

10.2 Инженерный подход к решению задачи оптимального синтеза надежности ТСС

Под оптимизацией в данном подходе принимается выбор варианта ТС с наименьшими капиталовложениями в резервирование для обеспечения требуемого уровня надежности теплоснабжения.

Для решения задачи выбираются конкурирующие варианты ТС с одинаковой надежностью, но не ниже нормированной. Решение задачи может быть расширено путем учета эксплуатационных расходов. В этом случае в качестве критерия используются приведенные затраты. Решение задачи является приближенным, так как сводится к выбору наиболее экономичного варианта из предполагаемых к рассмотрению. Решение задачи при инженерном подходе выполняется в нескольких этапах.

На *первом этапе* рассматриваются возможные структуры ТС для обеспечения требуемой надежности и чисто инженерным анализом обосновываются конкурирующие варианты. Этому способствуют опыт исследователей и статистические данные по надежности и другим показателям эксплуатации ТС.

Второй этап состоит в расчете вероятностных показателей надежности ТС и определении интегрального показателя $R_{cr}(t)$ в соответствии с главой 9.

При наличии кольцевых участков ТС (структурное резервирование) необходимо оценить вклады в ненадежность ТС кольцевой части и некольцевой части. Их соотношение дает возможность определить направленность основных усилий и капиталовложений на обеспечение надежности ТСС.

Если расчетное значение $R_{cr}(t) < R_{cr}^{nop}(t)$, то данный вариант в дальнейшем не рассматривается или в него вносятся дополнительные предложения, то есть появляется новый конкурирующий вариант.

На *третьем этапе* определяют транспортный резерв для кольцевой сети (выбор диаметров) и нерезервированных участков (выбор мощности РТП). При этом выбираются аварийные режимы, приводящие к максимальным потерям мощности у потребителей. Процесс определения транспортного резерва является итерационным, особенно для кольцевых сетей.

10.3 Математическая формулировка задачи синтеза оптимальных ТСС

В общем случае задача синтеза оптимальной ТСС для заданного уровня нагрузок состоит в определении:

- оптимальной структуры ТСС в отношении числа, мест расположения и типов ИТ, конфигурации ТС с учетом резервирования, узлов и участков ТС, входящих в резервированную и не резервируемую части системы;
- оптимальных параметров элементов системы - состава и типоразмеров оборудования ИТ, напоров на коллекторах источников, параметров и мест расположения НС, диаметров участков ТС и расходов на них, давлений в узлах сети и у потребителей.

При этом должны уточняться необходимость реконструкции существующих ИТ, участков сетей и другого оборудования. Выбранная структура и параметры ТСС должны обеспечивать требования по надежности. Учет существующего состояния и требований надежности значительно усложняет задачу, поскольку приводит:

- 1) к переходу структуры ТС в класс многокольцевых;
- 2) к замене непрерывной целевой функции дискретной с наличием локальных минимумов;
- 3) к усложнению системы ограничений;
- 4) к появлению не полностью формализуемых положений.

Решение подобных задач базируется на методике избыточных проектных схем, позволяющая осуществлять перебор вариантов построения ТСС формализовано. Избыточная структура строится исследователем и представляет собой совокупность всех допустимых вариантов сети и расположений ИТ. На схеме выделяются существующие ИТ, участки ТС и НС. Для реализации решения систем условий и ограничений должна отражать объективно присущие ТСС свойства.

Описание области допустимых решений должно включать:

- балансовые условия первого закона Кирхгофа для источников и ветвевых схем;
- подсистему соотношений, связывающих потери на участке с его параметрами и расходом;
- ограничения на мощности ИТ и расходы на участках ТС;
- условия, обеспечивающие требования по надежности теплоснабжения потребителей;
- условия резервирования ТС;
- условия дискретности оборудования;

- условия выбора способов реконструкции существующих элементов ТСС;
- ограничения на давления в узловых точках и скорости теплоносителя на участках ТС.

Целевая функция задачи представляет собой зависимость приведенных затрат (Z) от искомым структуры и параметров системы и включает затраты на ИТ ($Z_{и}$), на ТС ($Z_{с}$) и на замещающую электроэнергию ($Z_{э}$), если среди ИТ есть ТЭЦ

$$Z = Z_{и} + Z_{с} + Z_{э} = \alpha K + И + Z_{э}. \quad (10.1)$$

Составляющие затрат определяются в зависимости от мощности и типов ИТ, от схемы ТС, условий и типов прокладки теплопроводов, диаметров, длин и расходов на участках, давлений в узлах, напоров НС.

Задача состоит в минимизации функции (10.1) при вышеперечисленных условиях и ограничениях. В результате решения определяются: количество и мощность существующих и новых ИТ, их размещение по узлам схемы; количество резервируемых узлов; реконструируемые и новые участки ТС и их диаметры; напоры на участках; потокораспределение и давления в узлах расчетной схемы.

В связи с тем, что данная задача является задачей нелинейного программирования сетевого характера с линейными и нелинейными ограничениями, неравенствами и логическими условиями, решение возможно только с использованием специальных программ на ЭВМ. Описание алгоритма решения и программная реализация математических моделей приведены в [2].

Контрольные вопросы

1. Этапы инженерного подхода к решению задач оптимального синтеза ТСС.
2. Требования к математической модели синтеза оптимальных ТСС.
3. Целевая функция оптимального выбора ТСС.
4. Учет особенностей и ограничений в математической модели синтеза ТСС.

11 Нормирование надежности в ТСС

11.1 Анализ нормативных требований к надежности ТСС

Необходимость применения нормативов надежности в энергетике в общем случае обусловлены:

- 1) сложностью систем и процессов их функционирования;
- 2) относительно низкой точностью исходной информации, особенно при заблаговременности принятия решения;
- 3) необходимостью выработки массовых решений;
- 4) введением договорных условий энергообеспечения с учетом надежности.

Регламентация мер по обеспечению надежности теплоснабжения содержится в достаточно большом числе нормативных документах. Они включают в основном требования по резервированию элементов ИТ и НС, нормативы по запасам топлива, материалов и механизмов, а также по автоматизации и контролю. В различных СНиПах даются оптимальные и допустимые параметры климата в зданиях; ремонтные показатели и оснащенность механизмами для производства ремонтных работ; требования автоматизации и контроля.

Большое значение имело включение в ГОСТы и СНиПы численных значений ПН основного оборудования ТЭЦ, применение переключателей для резервирования теплоснабжения, резервирование подачи тепла за счет совместной работы ИТ, регламентация не только нормальных, но и в аварийных режимов работы ТСС. Однако действующие документы не предусматривают оценки надежности ни ТСС в целом, ни ИТ и ТС. Кроме того, СНиПы не указывают при каких минимальных допустимых температурах воздуха в зданиях, времени восстановления и коэффициенте аккумуляции определены нормативные значения минимальной подачи тепла потребителям. В документах недостаточно полно сформулированы требования к структуре крупных ТСС, к автоматизации их узлов управления. Практически основные требования к надежности определены для тупиковых ТСС.

11.2 Структура и обоснование нормативов надежности ТСС

При нормировании и оптимизации надежности ТСС можно выделить две группы ПН:

- I – нормативные значения вероятностных показателей надежности;
- II – нормативные значения величин, необходимых для расчета ПН.

Группа I включает нормативные значения ПН теплоснабжения потребителей: коэффициент готовности (K_j) или среднего суммарного времени неготовности (Z_j) и вероятности безотказной работы (R_j), частоту отказов (A_j) для рассматриваемых (j) уровней надежности.

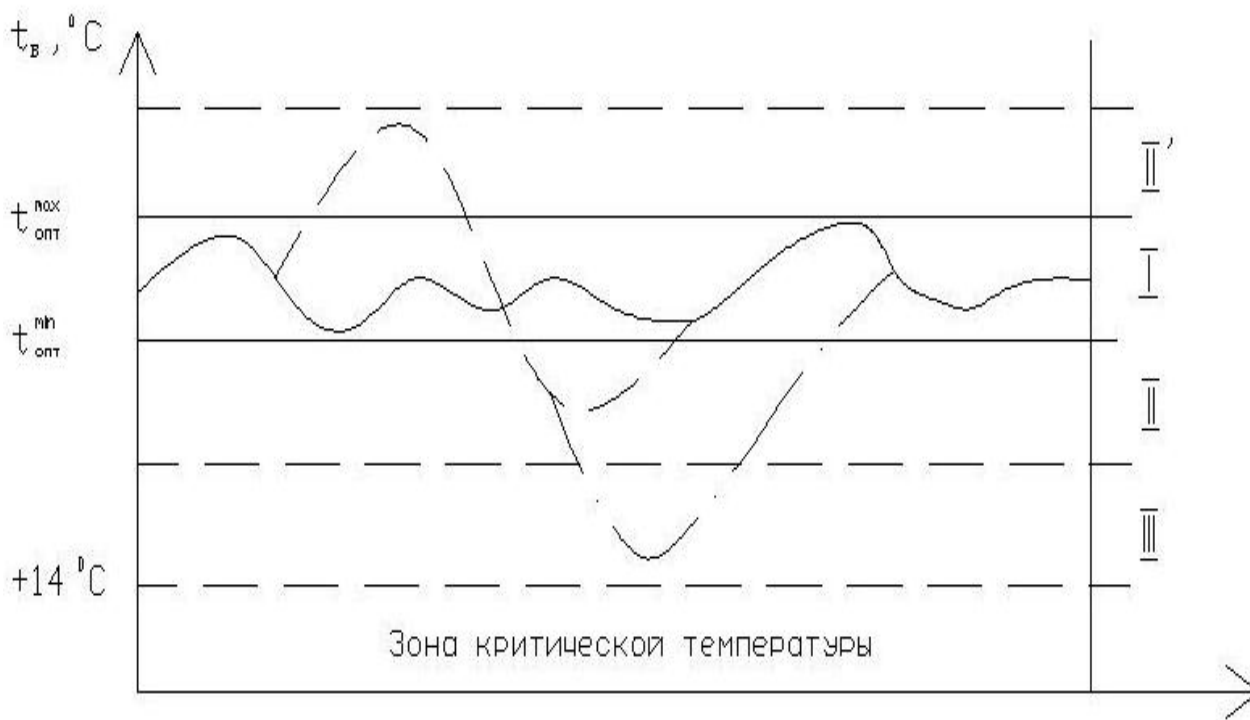
Группа II нормативов должна включать:

- количество рассматриваемых уровней надежности;

- значения минимально допустимых температур воздуха в зданиях для данного уровня надежности;
- нормы резервной подачи тепловой энергии потребителям во время аварии на участках резервированной части ТС;
- нормативные значения времени восстановления;
- коэффициенты аккумулирующей способности различных зданий;
- расчетный период для оценки надежности.

При нормировании ПН необходимо учитывать специфику ТСС и в первую очередь санитарно-гигиенические требования потребителей к микроклимату в помещениях. Экономические факторы при нормировании отходят на второй план.

Выбор количества рассматриваемых уровней надежности, а также граничных (минимально допустимых) для этих уровней температур воздуха внутри помещения (t_{\min}^r) связан с проблемами микроклимата помещений и теплоощущений человека. Тепловое самочувствие влияет на производительность и травматизм человека. При анализе тепловых режимов зданий массовой застройки выделяют три зоны значений температур внутри помещения (рисунок 11.1).



I – комфортная зона; II, II' – допустимые зоны в течение отопительного сезона;
III – допустимая зона при редких отклонениях

Рисунок 11.1 – Диаграмма температурного режима помещения:

Зона I – диапазон изменения оптимальных температур. Зона II и II' - диапазон внутренних температур, который при редких случайных попаданий в него является допустимым. В еще более редких случаях допускается отклонения,

приводящие к пребыванию человека в зоне III, в которой тепловое состояние людей остается еще допустимой. При этом значение $t_b = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ – минимальная температура, при которой еще обеспечивается уравнивание теплообмена человека с окружающей средой. Длительное пребывание в покое при $t < 14 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к охлаждению глубоких тканей и простудным заболеваниям.

Метеоусловия в помещении при $t < 12 \text{ }^\circ\text{C}$ критические, так как пребывание в них человека опасно для здоровья и создаются аварийные условия для зданий и сооружений.

Данный анализ микроклимата в зданиях позволяет сделать вывод, что при нормировании надежности следует рассматривать два уровня: расчетный и пониженный (I, II на рисунке 11.1). Каждому уровню соответствует свое значение граничной температуры внутреннего воздуха, нарушение которой приводят к отказу относительно данного уровня. Соответственно должно быть принято $t_{\min}^{(1)}$ равным расчетной температур внутреннего воздуха $t_{вп}$, а $t_{\min}^{(2)} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$.

Надежность первого уровня оценивается узловым коэффициентом готовности $K_j^{(1)}$, при этом отказы допускаются несколько раз в сезон. Для оценки надежности второго уровня, отказы относительно которого допускаются 1 раз в несколько лет, используется вероятность безотказной работы за отопительный период ($R_j^{(1)}$), либо частота отказов относительно второго уровня $a_j^{(2)}$. В подходе, использующем интегральный ПН, значения граничных температур для пониженных уровней приняты $12 \text{ }^\circ\text{C}$ и в некоторых случаях возможно $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для получения нормативных значений интегрального показателя $R_{с.т}(t)$ используются нормативные параметры потоков отказов ω :

$$\text{для теплопровода (трубы) } \omega_t = 0,05 \cdot \frac{1}{\text{год} \cdot \text{км}};$$

$$\text{для стальной задвижки } \omega_z = 0,002 \cdot \frac{1}{\text{год}}.$$

С учетом влияния на ПП диаметров $t_{нр}$ и других факторов нормированная величина $R_{с.т}(t)$ определена в зависимости от расчетной нагрузки на отопление:

$Q_o, \text{ МВт}$	500	1000	1500	2000	2500	3000
$R_{с.т}(t)$	0,941	0,966	0,977	0,983	0,986	0,988.

Контрольные вопросы

1. Необходимость нормирования надежности ТСС.
2. Примеры косвенного нормирования надежности ТСС.
3. Структура нормативов показателей надежности ТСС.
4. Уровни расчета и нормирования надежности ТСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии изложены основные традиционные методы определения статистической оценки и расчета показателей надежности систем теплоснабжения.

В работе приведены методические материалы, нацеленные на «ручной» счет, без применения ЭВМ. Авторы считают, что «ручной» счет позволяет качественно понять рассматриваемую проблему и «почувствовать» реальность полученных промежуточных и конечных результатов расчета.

Появление новых материалов и методов прокладки тепловых сетей требует пересмотра многих вопросов надежности обеспечения потребителей.

В пособии не рассмотрены многие вопросы, в частности – диагностика состояния элементов систем теплоснабжения, оценка остаточного ресурса оборудования, расчет надежности элементов при проектировании, влияние ремонтов, живучесть и безопасность теплоснабжающих систем не только водяных тепловых сетей, но и паровых трубопроводных систем.

Проблема построения надежных теплоснабжающих систем при минимальных затратах чрезвычайно актуальна в современных условиях, когда остро стоит вопрос о конкурентоспособности централизованного теплоснабжения на рынках тепловой энергии.

Обоснованное решение этой проблемы требует определения рационального соотношения элементной и структурной надежности систем теплоснабжения, то есть решения вопроса о том, какая доля в требуемом повышении надежности должна обеспечиваться резервированием, а какая - улучшением качества элементов системы.

Значительное увеличение стоимости тепловой энергии меняет отношение к измерениям и автоматическому регулированию теплоснабжения, способствуя их внедрению.

Таким образом, дальнейшие исследования в области надежности теплоснабжения должны быть направлены на обеспечение оптимального сочетания двух основных способов обеспечения надежности: резервирования и повышения технического уровня систем, включая качество теплопроводов и оборудование источников, абонентских установок, а также оснащенность систем приборами учета и регулирования.

Авторы с благодарностью примет Ваши предложения и замечания для корректировки и улучшения представленного материала и для написания учебных пособий для самостоятельной работы студентов и практических занятий по данной дисциплине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ионин А.А. Надежность систем тепловых сетей. М.: Стройиздат, 1989. 268 с.
2. Надежность систем энергетики и их оборудования: справочное издание в 4 т / Под общ. ред. академика Ю.А. Руденко. – Т. 4: Надежность систем теплоснабжения. / Е.В. Сеннова, А.В. Смирнов, А.А. Ионин и [др.]; отв. ред. Е.В. Сеннова. 2000. 349 с.
3. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2009. 360 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Основные понятия. Исходные положения расчета надежности теплоснабжающих систем	4
1.1 Особенности теплоснабжающих систем (ТСС).....	4
1.2 Основные свойства крупных ТСС.....	5
1.3 Надежность и ее свойства.....	6
1.4. Состояния и события, характеризующие надежность ТСС.....	6
Контрольные вопросы.....	9
2 Показатели надежности элементов и систем	10
2.1 Показатели надежности элементов.....	10
2.2 Показатели надежности ТСС.....	12
Контрольные вопросы.....	13
3 Общие принципы решения задач анализа и синтеза надежности ТСС	14
3.1 Основные методические положения.....	14
3.2 Состав задач анализа и синтеза надежности ТСС.....	14
Контрольные вопросы.....	17
4 Элементы теории вероятностей	18
4.1 Основные характеристики случайных величин.....	18
4.2 Законы распределения случайных величин.....	21
4.2.1 Распределение дискретных случайных величин.....	21
4.2.2 Распределения непрерывных случайных величин.....	22
Контрольные вопросы.....	25
5 Статистическая оценка показателей надежности элементов ТСС	26
5.1 Статистические показатели надежности элементов оборудования ТСС.....	29
5.2 Показатели надежности оборудования ТЭЦ.....	34
5.3 Тепловые сети.....	34
5.4 Насосные станции.....	38
Контрольные вопросы.....	39
6 Обеспечение надежного функционирования ТСС в процессе эксплуатации	40
6.1 Управление режимами ТСС.....	40
6.2 Гидравлическая устойчивость ТСС.....	41
Контрольные вопросы.....	43
7 Показатель качества функционирования тепловых сетей	44
7.1 Оценка надежности системы тепловых сетей.....	44
7.2 Анализ показателя надежности $R_{ct}(t)$	48
Контрольные вопросы.....	50
8 Расчет транспортного резерва тепловых сетей	51
8.1 Показатели лимитированного теплоснабжения.....	51
8.2 Лимитированное теплоснабжение.....	51
Контрольные вопросы.....	53
9 Методика расчета надежности нерезервированных тепловых сетей	54

9.1 Пример расчета надежности тупиковой разветвленной тепловой сети.....	55
Контрольные вопросы.....	59
10 Оптимальный синтез надежности ТСС.....	60
10.1 Общие положения.....	60
10.2 Инженерный подход к решению задачи оптимального синтеза надежности ТСС.....	60
10.3 Математическая формулировка задачи синтеза оптимальных ТСС.....	61
Контрольные вопросы.....	62
11 Нормирование надежности в ТСС.....	63
11.1 Анализ нормативных требований к надежности ТСС.....	63
11.2 Структура и обоснование нормативов надежности ТСС.....	63
Контрольные вопросы.....	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	66
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	67

Буйнов Николай Егорович
Бочкарев Виктор Александрович
Очиров Вадим Дансарунович

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Учебное пособие по дисциплине «Надежность, живучесть
и безопасность теплоэнергетических систем»
для студентов высших аграрных учебных заведений,
обучающихся в магистратуре по направлению подготовки
13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Лицензия на издательскую деятельность
ЛР № 070444 от 11.03.98 г.
Подписано в печать 19.01.2021 г.
Формат 60×86/16. Печ. л. 2,9
Тираж 15 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета им. А.А. Ежевского
664038, Иркутская область, Иркутский район
поселок Молодежный