

УДК 621.18-1/-9:51

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ
КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК С РЕЗЕРВНЫМ ТОПЛИВОМ****Ефимов А.Ю., Широ́в М.С., Панкова О.С.***ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва»
(национальный исследовательский университет), Саранск, e-mail: maksdid@mail.ru*

Настоящая статья посвящена математической оценке надежности и эффективной работы котельных установок (КУ) при введении резервного топливного хозяйства. В связи с ростом числа потребителей тепловой энергии соответственно возрастает нагрузка на магистрали, что приводит к росту вероятности возникновения аварийных ситуаций при транспортировке газа и, как следствие перерывов в теплоснабжении, что не допускается для значимых объектов. Одним из методов повышения надежности подвода тепла потребителям является внедрение резервного топлива. Схема газоснабжения котельной с присоединением резервного топлива в качестве дополнительного элемента с точки зрения математики представляет собой логическую схему. На первом этапе были рассмотрены структурные схемы надежности систем с учетом резервирования, а также отмечены их ключевые особенности. Был произведен анализ существующих методов расчета надежности и выделены наиболее подходящие под схему присоединения магистралей газопроводов и резервного топливного хозяйства рассматриваемой котельной. На втором этапе основываясь на статистических данных по отключениям, и существующим нормативам были проведены расчеты надежности каждым из методов. Полученные результаты расчетов наглядно отображают надежность безотказной работы с наличием резервной линии. В заключение сделан вывод, что метод резервирования путем восстановления наиболее эффективен.

Ключевые слова: резервное топливо, котельная установка, математическая модель, структурная схема, элемент

**MATHEMATICAL ASSESSMENT OF RELIABILITY OF WORK
OF BOILER PLANTS WITH RESERVE FUEL****Efimov A.Yu., Shirov M.S., Pankova O.S.***Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«National Research Ogarev Mordovia State University», Saransk, e-mail: maksdid@mail.ru*

This article is devoted to the mathematical evaluation of the reliability and efficient operation of boiler plants (BP) when introducing a backup fuel economy. Due to the growing number of consumers of thermal energy, the load on the main lines increases accordingly, which leads to an increase in the likelihood of emergency situations during gas transportation, and as a result of interruptions in heat supply, which is not allowed for significant facilities. One of the methods to improve the reliability of heat supply to consumers is the introduction of backup fuel. The gas supply scheme of the boiler house with the addition of backup fuel as an additional element from the point of view of mathematics is a logical scheme. At the first stage, structural schemes of the reliability of systems with redundancy were considered, and their key features were noted. The analysis of existing methods for calculating the reliability was made, and the most suitable ones for the scheme of connecting gas pipelines and reserve fuel facilities of the boiler house under consideration were identified. At the second stage, based on statistical data on outages, and existing standards, calculations of the reliability of each method were carried out. The results of the calculations clearly show the reliability of trouble-free operation with the presence of a backup line. In conclusion, it is concluded that the method of backup through recovery is most effective.

Keywords: reserve fuel, boiler plant, mathematical model, structural diagram, element

В настоящее время для выработки тепловой энергии основным видом топлива, обычно является природный газ, поставляемый по газопроводу. Бесперебойность подачи данного топлива в КУ, как показывает практика, зависит напрямую от надежности каждого элемента входящего в систему обеспечения топлива. При строительстве новых микрорайонов, а также с постоянным ростом числа потребителей тепловой энергии необходима модернизация существующих КУ. Это непосредственно сказывается на увеличении объемов потребления природного газа, при этом возрастает нагрузка на магистрали.

Совокупность таких факторов обычно приводит к росту числа аварийных и нештатных ситуаций [1]. Предполагается,

что самым простым решением является строительство дополнительных газо-трубопроводов, но это трудоемкий и длительный процесс, требующий огромных материальных затрат.

При отказах во время аварийных ситуаций, связанных с перебоями газоснабжения в КУ установленных категорий и к особо значимым объектам, необходимо не допускать перерывов поставок тепла потребителям [1].

Вопрос надежности поставок резервного топлива в КУ и особенно в ТЭЦ в нашей стране становится все более определяющей задачей для теплоснабжающих организаций, а также разработка способов и методов надежной поставки топлива, его необходимого количества, параметров и качества.

Согласно [2] основным стимулирующим органом, влияющим на поддержание исправного состояния и безопасную работу оборудования, являются надзорные органы РФ.

С целью повышения энергосбережения и эффективности использования ресурсов предприятия, эксплуатирующие оборудование, обязаны обеспечить работу оборудования на резервном топливе, а также создавать запасы топлива для тепловых электростанций и источников тепловой энергии в соответствии с законодательством РФ в сфере электроэнергетики и теплоснабжения [3]. Помимо этого организации, эксплуатирующие топливное хозяйство, обязаны обеспечить его своевременную, бесперебойную подготовку и подачу в котельные агрегаты [4], учитывая категорию надежности КУ и условия эксплуатации оборудования.

Система топливного хозяйства в целом представляет собой структурную систему с минимальным количеством элементов, разработанную исходя из её функционального назначения с последующими модернизациями – добавлением дополнительных элементов данная схема, возможно, будет усложняться.

Для КУ «первой категории надежности» структурно-логическая схема представлена для двух элементов.

В качестве первого (основного) элемента, находящегося в работе, выступает подводимое к КУ топливо из газопровода (газ), а вторым резервным не задействованным элементом является мазут, дизельное топливо и т.д. во время неработоспособного состояния основного элемента, в дальнейшем «система».

Рассмотрим основные структурно-логические методы расчета резервирования, то есть способы повышения надежности работы объекта как «системы» в целом.

1. Расчет надежности «системы» с резервированием методом замещения без восстановления [5].

Рассмотрим структурно-логическую схему расчета надежности с резервированием замещением без восстановления, представленную на рис. 1.

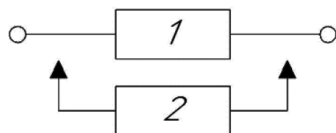


Рис. 1. Структурно-логическая схема расчета надежности системы с резервированием методом замещения без восстановления:
1 – основной элемент; 2 – элемент в ненагруженном резерве

Резервный элемент 2 включается в работу по мере отказа основного 1. Принимается, что оба элемента равнонадежны, а переключаемое устройство безотказно. Процесс функционирования данной группы приведен на рис. 2.

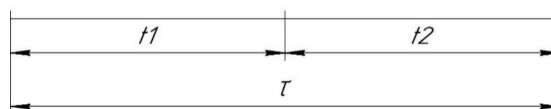


Рис. 2. Процесс функционирования группы из двух элементов с резервированием замещением без восстановления

Через случайный промежуток времени t_1 после начала работы группы происходит отказ основного элемента, вместо него мгновенно включается резервный на промежуток t_2 . Общий отказ группы наступит при отказе всех элементов.

Согласно [5], при определении вероятности безотказной работы группы в течение времени $P_p(t)$ формируются следующие события: A_0 – нет отказов в группе; A_1 – отказ первого элемента; A_2 – отказ второго элемента и, как следствие, отказ всей группы.

Отсюда по теореме сложения вероятностей определяется вероятность безотказной работы группы:

$$P_p(t) = P\left(\sum_{i=0}^{n-2} A_i\right) = \sum_{i=0}^{n-2} P(A_i).$$

А значение вероятности безотказной работы при резервировании основного элемента методом замещения без восстановления определяется как

$$P_p(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!}.$$

где λ – интенсивность отказов i -элемента за время t ;

n – количество элементов в «системе».

2. Расчет надежности резервирования «системы» с восстановлением [5].

Рассмотрим структурно-логическую схему расчета надежности «системы» резервированием с восстановлением, изображенную на рис. 3.

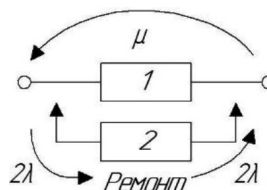


Рис. 3. Структурно-логическая схема функционирования «системы» резервированием с восстановлением

Предположим, что основной элемент топливоснабжения КУ с постоянной величиной (давления, калорийностью, температурой, потребления газа) и резервный элемент (топливное хозяйство) равнонадежны. Интенсивность отказов λ и время восстановления μ подчиняются экспоненциальному закону распределения. Во время заданного промежутка времени t могут возникнуть несколько вариантов состояния объекта КУ: S_1 – оба элемента в работоспособном состоянии; S_2 – резервный элемент задействован в момент восстановления основного; S_3 – отказ всей системы.

Опишем данный процесс с точки зрения теории графов состояний элементов. Схема графа состояния элементов «системы» представлена на рис. 4.

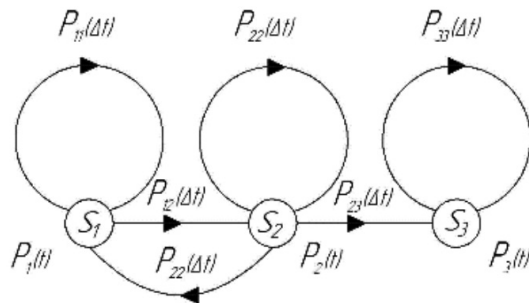


Рис. 4. Граф состояния элементов «системы» с восстановлением

1. Система на протяжении времени t находится в состоянии S_1 .

Вероятность $P_{11}(\Delta t)$ сохранять данное состояние определяется вероятностью безотказной работы обоих элементов за промежутки времени Δt :

$$P_{11}(\Delta t) = e^{-2\lambda\Delta t}.$$

А вероятность перехода из состояния S_1 в S_2 определяется выражением

$$P_{12}(\Delta t) = 1 - e^{-2\lambda\Delta t}.$$

2. Система находится в состоянии S_2 на протяжении времени t .

Вероятность $P_{22}(\Delta t)$ сохранять данное состояние определяется исходя из вероятности безотказной работы резервного элемента при одновременном отсутствии восстановления основного:

$$P_{22}(\Delta t) = 1 - (\lambda + \mu)\Delta t.$$

Вероятность $P_{21}(\Delta t)$ перехода объекта в состояние S_1 определяется как вероятность восстановления основного элемента при безотказной работе резервного:

$$P_{21}(\Delta t) = \mu\Delta t.$$

Вероятность $P_{23}(\Delta t)$, то есть перехода в состояние S_3 определяется как вероятность отказа основного элемента в момент невозможности восстановления резервного:

$$P_{23}(\Delta t) = \lambda\Delta t.$$

3. Система на протяжении времени t находится в состоянии S_3 .

Данное состояние характеризуется общим отказом системы в целом, то есть поглощающим. Так, вероятность безотказной работы за время t :

$$P_p(t) = P_1(t) + P_2(t).$$

А вероятность отказа при этом:

$$Q_p(t) = P_3(t).$$

После преобразований [5] получаем расчетную формулу вероятности безотказной работы «системы» в целом:

$$P_p(t) = \frac{a+b}{2a} e^{\left[-\frac{1}{2}(b-a)t\right]} + \frac{a-b}{2a} e^{\left[-\frac{1}{2}(b+a)t\right]},$$

где $a = \sqrt{\mu^2 + 6\mu\lambda + \lambda^2}$;

$$b = \mu + 3\lambda.$$

Метод резервирования путем замещения с восстановлением более эффективен, так как при расчете учитывается возможность восстановления отказавших элементов, составляющих «систему».

4. Расчет надежности с применением метода теории графов [5].

Применение данного метода существенно упрощает процесс составления уравнений для соответствующего состояния и переходов между ними, при этом предварительно рассчитывают и задаются значениями вероятности их сохранения и интенсивности перехода.

Вид графа состояний рассмотрим на примере структурного резервирования с восстановлением. Если в случае предыдущего метода рассматривается возможность восстановления лишь одного элемента во время запуска резервного. Но бывают случаи, когда требуется восстановить сразу несколько элементов несколькими бригадами, тогда процесс определения показателей надежности упрощается.

Благодаря методу графов мы можем рассматривать состояния элементов как независимые статически и рассчитать коэффициент готовности объекта. Для случая ненагруженного резервирования замещением при наличии одной ремонтной бригады и одного работающего элемента граф перехода состояния S_1 в S_2 будет выглядеть как

$$P_{12}(\Delta t) = \lambda\Delta t.$$

Значение вероятности безотказной работы при этом будет определяться по формуле

$$P_p(t) = \frac{c+d}{2c} e^{\left[-\frac{1}{2}(d-c)t\right]} + \frac{c-d}{2c} e^{\left[-\frac{1}{2}(c+d)t\right]},$$

где $c = \sqrt{\mu^2 + 4\mu\lambda}$;

$$d = \mu + 2\lambda.$$

Цель исследования заключается в определении необходимости внедрения резервного топлива в КУ «первой категории надежности», а также повышении надежности оборудования при наличии системы резервного топлива.

Материалы и методы исследования

Объектом научного исследования является КУ «ШТФ» в г. Рузевка РМ. Для сравнения эффективности каждого из рассматриваемых методов производились расчеты показателей вероятности безотказной работы КУ.

В числе потребителей тепловой энергии, отпускаемой рассматриваемой котельной, являются особо важные объекты, такие как школа, роддом, ЦРБ, и т.д. Интенсивность отказа первого элемента, то есть поломки газопроводов с «газ» диаметром 150 мм, в среднем составляет 10^{-5} раз¹/год, а общая продолжительность работы котельной в отопительный период в среднем составляет 5016 ч.

Результаты исследования и их обсуждения

Произведен расчет вероятности безотказной работы при резервировании основного элемента методом замещения, как без восстановления, так с восстановлением. Общее значение вероятности безотказной работы всей системы котельной с использованием резервного топлива будет определяться как сумма вероятностей каждого состояния системы, а именно:

$$P_p(t) = P(A_0) + P(A_1) + P(A_2),$$

где $P(A_0) = e^{-\lambda t}$ – нет отказов в группе;

$P(A_1) = \lambda t e^{-\lambda t}$ – отказ основного элемента;

$P(A_2) = \frac{(\lambda^2 t^2)}{2} \cdot e^{-\lambda t}$ – отказ всей системы.

Таким образом:

$$P_p(t) = e^{-\lambda t} \left(1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2} \right).$$

Подставляя значения применительно к рассматриваемой котельной, получим

$$P_p(t) = e^{-(10^{-5} \cdot 5016)} \times \left(1 + 10^{-5} \cdot 5016 + \frac{(10^{-5})^2 \cdot 5016^2}{2} \right) = 0,99 \approx 99\%.$$

Произведем расчет значения вероятности безотказной работы при резервировании основного элемента с восстановлением. Принимаем, что необходимый объем резервуаров с резервным топливом должен обеспечить бесперебойную работу котельного оборудования в течение 72 ч. Данного периода должно быть достаточно для проведения мероприятий по устранению неисправностей ремонтной бригадой.

Предварительно произведем расчет вспомогательных элементов:

$$a = \sqrt{72^2 + 6 \cdot 72 \cdot 10^{-5} + (10^{-5})^2} = 72,00,$$

$$b = 72 + 3 \cdot 0,00001 = 72,00.$$

$$P_p(t) = \frac{72+72}{2 \cdot 72} e^{\left[-\frac{1}{2}(72-72) \cdot 5016\right]} +$$

$$+ \frac{72-72}{2 \cdot 72} e^{\left[-\frac{1}{2}(72+72) \cdot 5016\right]} = 1 \approx 100\%.$$

Произведем расчет значения вероятности безотказной работы с применением методов теории графов.

Значения вспомогательных элементов при этом будут равны

$$c = \sqrt{72^2 + 4 \cdot 72 \cdot 10^{-5}} = 72,00,$$

$$d = 72 + 2 \cdot 10^{-5} = 72,00.$$

Значение вероятности безотказной работы при этом будет определяться по формуле

$$P_p(t) = \frac{72+72}{2 \cdot 72} e^{\left[-\frac{1}{2}(72-72) \cdot 5016\right]} +$$

$$+ \frac{72-72}{2 \cdot 72} e^{\left[-\frac{1}{2}(72+72) \cdot 5016\right]} = 1 \approx 100\%.$$

Выводы

В ходе проведенного расчетного метода можем сказать, что:

1. Резервное топливо в первую очередь позволит обеспечить бесперебойность работы КУ в моменты перебоев газоснабжения, не прерывая процесс отпуска тепла потребителям первой категории.

2. Показатели надежности работы КУ при резервировании с восстановлением элементов системы превышают показатели надежности резервирования замещением без восстановления.

Список литературы

1. Ефимов А.Ю., Марков В.А. Анализ и оценка проблем систем горячего водоснабжения // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузовский сборник научных трудов. Саранск, 2016. 173 с.
2. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/184452/#friends> (дата обращения: 15.09.2018).
3. Постановление Правительства РФ от 17 мая 2002 г. № 317 «Об утверждении Правил пользования газом и предоставления услуг по газоснабжению в Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями) [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/184452/#friends> (дата обращения: 15.09.2018).
4. Приказ Минэнерго РФ от 24 марта 2003 г. № 115 «Об утверждении Правил технической эксплуатации тепловых энергоустановок» [Электронный ресурс]. URL: <http://base.garant.ru/185671/#friends> (дата обращения: 10.09.2018).
5. Гуменюк В.М. Надежность и диагностика электро-технических систем: учебное пособие для вузов. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010. 218 с.