

УДК 621

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ
УЗЛОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО
МЕЖРЕМОНТНОГО ИНТЕРВАЛА**

Инж. ПАСЮК М. А.

ОАО «Белэнергоремналадка»

С точки зрения практической оценки надежности узлов теплотехнического оборудования, актуальна задача разработки математической модели надежности с учетом влияния режимов работы и основных воздействующих факторов. Это позволит повысить точность определения сроков предупредительных ремонтов, оценить надежность и эффективность использования теплотехнического оборудования, что, в свою очередь, будет способствовать снижению эксплуатационных расходов, оптимизации межремонтных интервалов (МРИ), продлению сроков службы и рациональному использованию паркового ресурса.

Количественной характеристикой работоспособности оборудования служит технический ресурс, под которым понимают наработку от начала

эксплуатации объекта или ее возобновления после предупредительного ремонта до наступления предельного состояния этого объекта. Размерность ресурса принимается временной (ч) и относительной (% , о. е.).

Часто в практике инженерных расчетов показателей надежности под ресурсом понимается некоторый располагаемый запас надежности. Запас надежности до начала эксплуатации объекта определяется как полный или исходный ресурс, а после начала эксплуатации – как оставшийся ресурс. Величина изменения запаса надежности за какой-либо отрезок времени рассматривается как сработанный ресурс за этот отрезок времени, показывающий во сколько раз изменился ресурс по сравнению с исходным.

Истощение ресурса или отказ какой-либо части приводит к неустойчивой работе или отключению всего устройства. Наименьший ресурс характеризуется полным истощением, соответственно длительность МРИ равна наименьшему ресурсу. Упорядоченная плановая последовательность ремонтов, основанная на приеме моментов возобновления ресурсов, вполне пригодна для современной энергетики и повсеместно применяется, но ее применение сопровождается неполным использованием рабочих частей и их вынужденным недоизносом, т. е. с потерями ресурса.

Основной показатель эксплуатационной надежности оборудования – вероятность безотказной работы – определяется [1] как вероятность того, что при работе в области допустимых режимов эксплуатации E на отрезке времени $[0, T]$ сработанный ресурс r не будет выходить за пределы допустимой области R :

$$P(t, \varepsilon, r) = P\{t \in [0, T], \varepsilon \in E, r(t, E) \leq R\}. \quad (1)$$

Всю область допустимых режимов эксплуатации E можно условно разбить на два подмножества с разной интенсивностью сработки ресурса: область переходных режимов E_n (пуск, останов, авария) и область стационарных длительных режимов E_c (степень нагружения). Следует отметить, что разработанные к настоящему времени технические средства диагностического контроля позволяют оценить величину сработанного ресурса в зависимости от реальных режимов эксплуатации различной интенсивности воздействующих факторов. Поэтому вероятность безотказной работы оборудования в условиях эксплуатации зависит от величины сработанного ресурса, зафиксированного на предыдущих этапах контроля, и не зависит от того, как и с какой интенсивностью он срабатывался.

Ресурс, сработанный за время t в режиме E , можно представить следующей функцией [1]:

$$r(t, \varepsilon) = -\ln P(t, \varepsilon). \quad (2)$$

В процессе эксплуатации оборудования скорость сработки ресурса является случайной величиной, поэтому безотказная работа оборудования – случайное событие. Оно включает в себя два других независимых случайных события: безотказную работу оборудования по условию отсутствия внезапных отказов и износовых отказов в переходных и стационарных режимах. Кроме того, принимается, что во время проведения испытаний оборудования выявляются все приработочные отказы, что позволяет в даль-

нейшем не учитывать их влияние на вероятность безотказной работы. Тогда, условно рассматривая оборудование как объект, состоящий из трех элементов, соединенных последовательно в смысле надежности, в первом из которых может появиться внезапный, а во втором и третьем – износосовый отказ, соответственно в переходных и стационарных режимах вероятность безотказной работы можно определить по формуле

$$P(t) = P_1(t)P_2(t)P_3(t), \quad (3)$$

где $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$ – вероятности отсутствия соответственно внезапных отказов и износосовых отказов в переходных и стационарных режимах работы.

Вероятность безотказной работы по условию отсутствия внезапных отказов определяется экспоненциальным законом

$$P_1(t) = \exp(-\lambda_6 t). \quad (4)$$

Здесь λ_6 – базисная интенсивность отказов.

Для каждого типа теплотехнического оборудования базисная интенсивность отказов является постоянной величиной и устанавливается исходя из данных статистики повреждаемости для большой выборки за длительный период эксплуатации на аналогичных по технологии применения объектах. Значение λ_6 определяется неблагоприятным сочетанием большого числа различных причин, не связанных с изменением технического состояния объекта. Внезапные отказы невозможно предвидеть и полностью устранить, так как каждый раз они вызваны специфическим набором случайных причин.

Рассмотрим определение вероятности безотказной работы по условиям отсутствия износосовых отказов в переходных и стационарных режимах.

Под действием различных режимов эксплуатации изменяется интенсивность действия внешних факторов, что приводит к неравномерной сработке ресурса. При этом скорость его ресурса при изменении режимов работы имеет монотонный характер, аппроксимируемый обычно линейной, степенной или экспоненциальной зависимостью.

Для примера рассмотрим влияние уровня виброскорости на изменение ресурса подшипников (рис. 1).

На рис. 1 видно, как изменение виброскорости $v(t)$ влияет на изменение ресурса $r(v)$. Разделив время работы оборудования на интервалы Δt , получаем сработанный ресурс $r(\Delta t)$ и изменение остаточного ресурса $R_0 - r(t)$.

Для формализации задачи определения вероятности безотказной работы по условиям отсутствия износосовых отказов в переходных и стационарных режимах принимаются следующие обозначения параметров модели [1]: R_0 – полный ресурс; R_n – исходный ресурс, характеризующий запас надежности от действия факторов в переходных режимах; R_c – то же по отношению к действию факторов в стационарных режимах; $r_n(t)$ – сработанный к моменту времени t ресурс в переходных режимах E_n ; $r_c(t)$ – то же в стационарных режимах E_c ; r_{nj} – часть ресурса, срабатываемая при одном пуске; r_{cj} – то же при воздействии нагрузок в базовом режиме работы; $n(t)$ – количество пусков за время t ; $f(\epsilon)$ – плотность распределения вероятности потока переменных нагрузок и перегрузок в стационарном режиме.

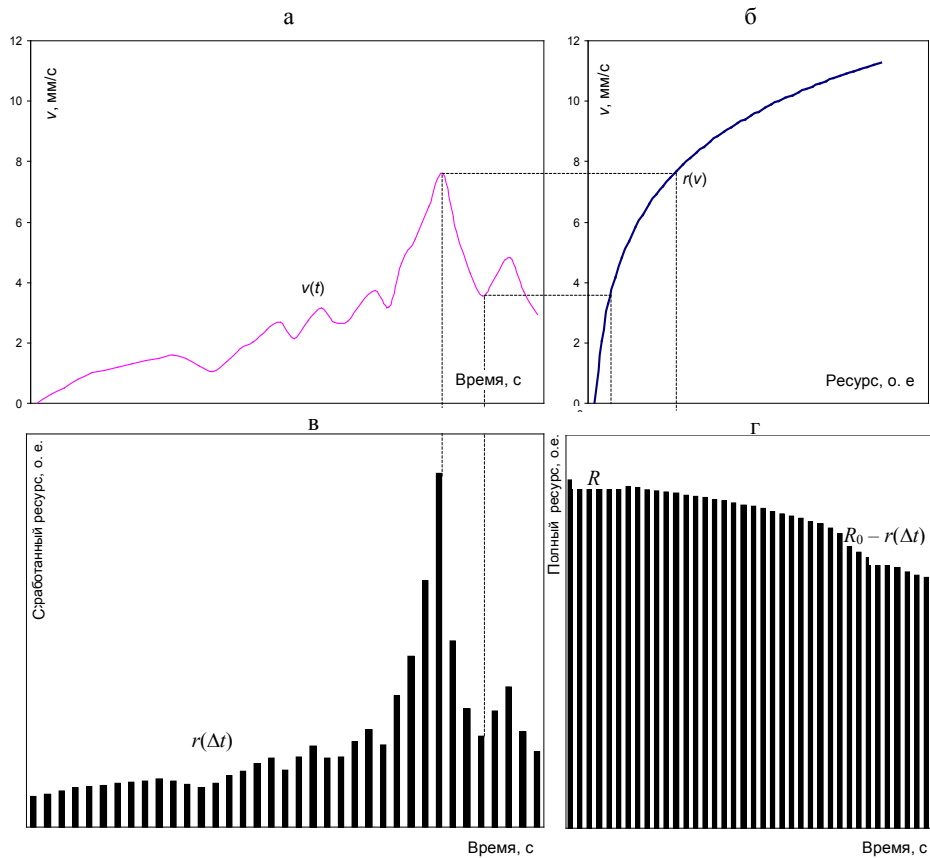


Рис. 1. а – изменение виброскорости подшипника во времени; б – зависимость сработки ресурса подшипника от виброскорости; в – сработка ресурса подшипника от виброскорости во времени; г – изменение остаточного ресурса подшипника во времени

Оборудование будет находиться в работоспособном состоянии до тех пор, пока не будет сработан ресурс R_0 . Поэтому вероятность безотказной работы к моменту времени t определится как

$$P_{2-3}(t) = P_2(t)P_3(t) = P\{r(t) \leq R_0\}. \quad (5)$$

Также вероятность безотказной работы оборудования можно определить как вероятность совмещения независимых событий [1]:

$$P_2(t, E_n) = P\{r_n(t) < R_n\}; \quad (6)$$

$$P_3(t, E_c) = P\{r_c(t) < R_c\}. \quad (7)$$

Средства эксплуатационного контроля в большинстве случаев позволяют регистрировать текущие и накапливаемые значения r_{ni} и r_{ci} за отрезок времени любой продолжительности.

Пусковые режимы теплотехнического оборудования связаны с повышенным износом ресурса. На начальной стадии набора оборотов турбины увеличивается износ узлов из-за повышенной вибрации и тепловых перемещений, износ уплотнений – из-за неравномерного или быстрого прогрева корпусных элементов и т. д. В малорасходных режимах повышенный

износ элементов роторной части происходит в результате нерасчетного режима работы с повышенными нагрузками на одни элементы и недогрузками – на другие, повышенными, неравномерными и циклическими нагрузками и т. д. Так как каждый раз изменение параметров вызвано специфическим набором случайных причин, сработка ресурса принимается индивидуальной для каждого пуска.

Значение ресурса $r_{\text{п}}(t)$ определяется по формуле

$$r_{\text{п}}(t) = \sum_{i=1}^{n(t)} r_{\text{п}i} n(t). \quad (8)$$

Для основной части теплотехнического оборудования оптимален режим с нагрузкой 60–80 %, а режимы, выходящие за эти пределы, несут с собой повышенную сработку ресурса. Например, изменение нагрузки теплофикационной турбины в стационарном режиме (при работе по электрическому графику) приводит к изменению вибрации, температур пара по ступеням, нагрузки на подшипники и проявляет индивидуальные режимные ограничения для каждой турбины. Поэтому целесообразно применить поправку на изменение режима работы оборудования (рис. 2).

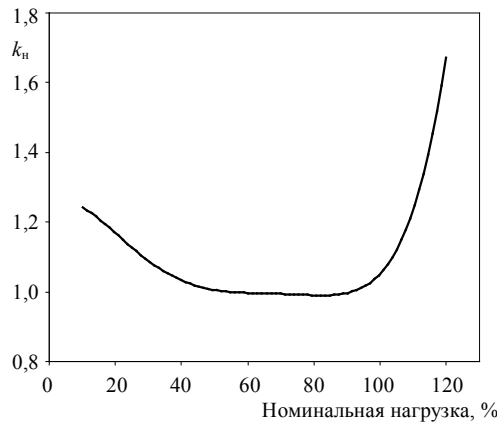


Рис. 2. Поправка на отклонение от номинальной нагрузки

Значение ресурса $r_c(t)$ определяется следующим образом:

$$r_c(t) = \sum_{i=1}^n r_{ci}(k_n) \frac{t}{t_n}, \quad (9)$$

где $r_{ci}(k_n)$ – расход ресурса оборудования (узла) при работе в стационаре с поправкой на отклонения от номинальной нагрузки k_n ; t_n – годовая нагрузка.

Подставляя выражения (6), (7) в (4), получим:

$$P_2(t, E_{\text{п}}) = \exp \left[- \sum_{i=1}^{n(t)} r_{\text{п}i} n(t_{\text{п}i}) \right]; \quad (10)$$

$$P_3(t, E_c) = \exp \left[- \sum_{i=1}^n r_{ci}(k_H) \frac{t}{t_H} \right]. \quad (11)$$

Для определения вероятности безотказной работы совместного действия нескольких факторов получим

$$P(t, \varepsilon, r) = \exp \left[- \lambda_6 t - \sum_{i=1}^{n(t)} r_{ni}(t) n(t) - \sum_{i=1}^n r_{ni}(k_H) \frac{t}{t_H} \right]. \quad (12)$$

Выражение (12) представляет собой формализованную запись математической модели определения эксплуатационной вероятности безотказной работы с учетом результатов контроля воздействующих на энергетическое оборудование факторов. Ее целесообразно использовать при недостаточном (невозможном) объеме средств диагностического контроля.

ВЫВОДЫ

Предложена математическая модель надежности с учетом влияния режимов работы и основных воздействующих факторов.

Ее использование способствует снижению эксплуатационных расходов, оптимизации межремонтных интервалов, продлению сроков службы и рациональному использованию паркового ресурса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назарычев, А. Н. Методы и модели оптимизации ремонта оборудования объектов энергетики с учетом технического состояния / А. Н. Назарычев; под ред. В. А. Савельева. – Иваново, 2002. – 168 с.
2. Коварский, Л. Г. Расчетные основы оптимизации ремонта энергооборудования / Л. Г. Коварский. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 112 с.
3. Надежность систем энергетики. Терминология. – М.: Наука, 1980. – Вып. 95. – 42 с.
4. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
5. Савельев, В. А. Оперативное управление техническим состоянием машин / В. А. Савельев, А. Н. Назарычев // Технология и организация производства. – 1987. – № 3. – С. 15–18.

Представлена техническим советом

Поступила 09.09.2008