

УДК 681.32

DOI 10.51691/2541-8327_2021_10_2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Бутина Т. А.

к.ф.-м.н, доцент,

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.

Баумана (национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Дубровин В. М.

к.т.н, доцент,

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.

Баумана (национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Полякова Н. С.

к.ф.-м.н, доцент,

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э.

Баумана (национальный исследовательский университет)

Москва, Россия

Аннотация

В настоящей статье оценивается влияние на техническое состояние и, следовательно, эксплуатационную надежность оборудования некоторых из факторов таких, как режим и условия эксплуатации, порядок и периодичность технического обслуживания и ремонта, условия хранения и транспортировки.

Рассматривается однотипное оборудование (агрегаты, машины, устройства), работоспособность которых определяется параметром технического состояния.

Ключевые слова: оборудование, техническое состояние, работоспособность, диагностика, параметр технического состояния, упреждающий допуск, техническое обслуживание, периодичность, надежность.

***SIMULATION OF THE TECHNICAL CONDITION AND OPERATING
CAPACITY OF THE EQUIPMENT DURING ITS OPERATION***

Butina T. A.

PhD, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Dubrovin V. M.

PhD, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Polyakova N. S.

PhD, Associate Professor

Bauman Moscow State Technical University

Moscow, Russia

Annotation This article evaluates the impact on the technical condition and, consequently, the operational reliability of the equipment of some of the factors, such as the mode and operating conditions, the procedure and frequency of maintenance and repair, storage and transportation conditions. We consider the same type of equipment (units, machines, devices), the performance of which is determined by the parameter of the technical condition.

Keywords: equipment, technical condition, operability, diagnostics, technical condition parameter, anticipatory admission, maintenance, frequency, reliability.

Введение. Работоспособность и эксплуатационная надежность однотипного оборудования определяется параметром технического состояния $h(t)$ ([1], [5]). В заранее установленные сроки после начала эксплуатации оборудование проходит диагностику технического состояния. По ее результатам определяется необходимость технического обслуживания или ремонта оборудования. Очевидно, что затраты на эксплуатацию оборудования будут зависеть от периодичности диагностики. При ее малом периоде оборудование на момент проверки будет находиться в исправном состоянии и требуется выполнить только его техническое обслуживание или текущий ремонт. При этом имеют место затраты на проведение диагностики и технического обслуживания или текущего ремонта, а также затраты, связанные с простоем оборудования на время проведения этих операций. При увеличении периода диагностики эти затраты снижаются, но возрастает вероятность выхода оборудования из рабочего состояния в течение этого периода, что приведет к затратам на восстановление или замену оборудования. Поэтому следует иметь такую периодичность диагностики, чтобы суммарные затраты на обеспечение работоспособности оборудования за время его эксплуатации были наименьшими.

Метод определения периодичности диагностики оборудования.

Предполагается, что работоспособность оборудования определяется параметром технического состояния $h(t)$. Для оборудования возможно 3 состояния: исправное состояние (не требуется исправления или ремонта), состояние технического обслуживания (требуется исправления или текущий ремонт), неработоспособное состояние (требуется капитальный ремонт или замена оборудования [6], [7]).

Пусть $h(t)$ – монотонная случайная функция неслучайного аргумента. Динамика изменения параметра характеризуется веером реализаций, а случайная величина его ресурса – плотность распределения отказов отказов оборудования $f(t)$. Превышение предельного значения $h_{кр}$ параметра h приводит к отказу оборудования, непревышение допустимого значения h_0 параметра h на момент диагностики обеспечивает с заданной вероятностью работоспособность оборудования до следующего момента диагностики. Упреждающий допуск параметра в процессе эксплуатации равен $Dh = |h_0 - h_{кр}|$. Изменение упреждающего допуска и периодичности диагностики влияет на вероятность отказа оборудования и стоимости его эксплуатации. Кроме того, для каждого типа оборудования вводится понятие номинального (нормированного) значения h_n параметра h . Величины $h_{кр}$, h_n устанавливаются отраслевой нормативной документацией [2]. Схема изменения параметра $h(t)$ [3; 4] для оборудования с тремя состояниями работоспособности представлена на рис. 1.

Пусть в момент времени t выполняется диагностика технического состояния оборудования. Если в этот момент $h(t) \leq h_0$, то оборудование допускается к дальнейшей эксплуатации, если $h_0 < h(t) < h_{кр}$, то проводится техническое обслуживание или текущий ремонт оборудования, при $h(t) \geq h_{кр}$,

проводится капитальный ремонт или замена оборудования. Изменение $h(t)$ может быть представлено функцией вида

$$h(t) = at^a + b,$$

где a – коэффициент, характеризующий скорость изменения параметра технического состояния в период эксплуатации,

b – коэффициент изменения параметра за время приработки оборудования.

Функция $f(t)$ – плотность распределения отказов оборудования. Может быть получена в результате статистического анализа.

Пусть L - функция удельных суммарных затрат на эксплуатацию оборудования за время T . Тогда задача определения оптимальной периодичности контроля технического состояния оборудования можно сформулировать следующим образом:

определить периодичность диагностики оборудования t_1 и величину упреждающего допуска Dh , обеспечивающих минимальное значение функции L , при заданном уровне надежности оборудования [2], [8].

За период времени t_1 могут иметь место следующие события:

1. Откажет оборудование и будет произведена его замена или капитальный ремонт. В этом случае имеют место затраты на устранение последствий отказа и издержки от простоя оборудования за время ремонта. Вероятность такого события

$$p_1 = \int_0^{t_1} f(t)dt$$

2. До момента времени t_1 оборудование работает безотказно, но результаты диагностики говорят о необходимости выполнить его техническое обслуживание или текущий ремонт. В этом случае будут произведены затраты на диагностику, техническое обслуживание и издержки от простоя оборудования за время диагностики и технического обслуживания. Вероятность такого события
- $$p_2 = P\{\text{отказ при } t_1 \cup t \cup t_1 + t_2 \mid \text{при } 0 \cup t \cup t_1 \text{ нет отказов}\}$$

$$p_2 = \int_{t_1}^{t_1+t_2} f(t)dt,$$

где t_2 - время достижения параметром $h(t)$ значения h_0 .

3. Оборудование работает безотказно до времени t_1 и по результатам диагностики признается годным для дальнейшей эксплуатации. В этом случае будут произведены затраты только на диагностику и издержки от простоя оборудования за время диагностики. Вероятность такого события

$$p_3 = P\{\text{нет отказов при } t_1 \cup t \cup t_1 + t_2 \mid \text{при } 0 \cup t \cup t_1 \text{ нет отказов}\}$$

$$p_3 = \int_{t_1+t_2}^{\infty} f(t)dt$$

Построение и оптимизация целевой функции L выполнялись для схемы с тремя состояниями, как показано на рисунке. Кроме того, принималось, что этот случайный процесс удовлетворяет условиям стационарности пуассоновского потока. Это значит:

- вероятность отказов зависит только от длины участков наблюдения и не зависит от места расположения участка;
- для любых непересекающихся участков времени число событий,

- попадающих на один из них, не зависит от числа событий,
попадающих на другие участки;
– вероятность попадания на бесконечно малый участок двух или более отказов мала по сравнению с вероятностью попадания одного отказа.

Издержки на техническое обслуживание, ремонт и потери от простоя будут складываться из:

- а) стоимости капитального ремонта или замены отказавшего оборудования за время t_1

$$c_1 = a_1 p_1,$$

где a_1 - средняя стоимость капитального ремонта (замены) отказавшего оборудования;

- б) потери от простоя отказавшего оборудования за время t_1

$$c_2 = a_2 T_{np} p_1,$$

где a_2 - удельная стоимость простоя оборудования,

$$T_{np} = t_1 - \int_0^{t_1} t f(t) dt - \text{средняя продолжительность простоя};$$

- в) стоимости диагностики оборудования, не отказавшего к моменту времени t_1

$$c_3 = a_3 (p_2 + p_3),$$

где a_3 - средняя стоимость диагностики,

$$p_2 + p_3 = \int_{t_1}^{\Gamma} f(t) dt;$$

- г) потери от простоя оборудования за время дагностики

$$c_4 = a_2 T_0 (p_2 + p_3),$$

где T_0 - средняя продолжительность диагностики;

д) стоимости технического обслуживания (текущего ремонта) оборудования, не отказавшего к моменту времени t_1 и контролируемый параметр которого находится в поле упреждающего допуска ($h_0 < h(t) < h_{кр}$)

$$c_5 = a_4 p_3,$$

где a_4 - средняя стоимость технического обслуживания (текущего ремонта);

е) потерь от простоя оборудования за время технического обслуживания (текущего ремонта)

$$c_6 = a_2 T_{TO} p_2,$$

где T_{TO} - средняя продолжительность технического обслуживания (текущего ремонта).

С учетом полученных соотношений целевая функция L будет иметь вид (рассматриваются издержки на единицу времени):

$$L = \frac{1}{t_1} \sum_{k=1}^6 c_k.$$

После подстановки в это соотношение c_k и, учитывая, что

$$\int_{t_1}^{\infty} f(t) dt = 1 - \int_0^{t_1} f(t) dt, \text{ получаем (отбросив константы } a_3 + a_2 T_0 + a_4)$$

$$L = \frac{1}{t_1} (a_1 + a_2 t_1 - a_2 \int_0^{t_1} t f(t) dt - a_3 - a_2 T_0 - a_4) \int_0^{t_1} f(t) dt + (-a_4 + a_2 T_{TO}) \int_{t_1}^{t_1+t_2} f(t) dt.$$

Функция L зависит от переменных t_1 и t_2 . Зависимость от t_2 более простая, поэтому оптимизацию L начнем с определения оптимального значения t_2 .

$$L\check{y} = \frac{1}{t_1}(-a_4 + a_2 T_{TO})f(t_1 + t_2).$$

Так как плотность отказов, согласно исходному предположению, подчиняется экспоненциальному закону

$$f(t) = l e^{-lt}, \quad l > 0,$$

то $f(t_1 + t_2) = l e^{-(t_1+t_2)}$ №0. Это означает, что функция L является монотонной по t_2 и ее оптимальное значение может быть достигнуто только на концах интервалов. В соответствии с принятыми предположениями $0 \leq t_2 \leq t_1$. Из условия стационарности рассматриваемого процесса $t_2 = t_1$. Физически это означает, что, так как стоимость капитального ремонта или замены отказавшего оборудования выше стоимости его технического обслуживания, нельзя допускать к дальнейшей эксплуатации оборудование, параметр технического состояния которого на момент диагностики находится в поле упреждающего допуска. Из условия $t_2 = t_1$ может быть получена оптимальная величина допуска. Принимая закон изменения параметра технического состояния в виде $h(t) = at^a$, будем иметь $h_{кр} = a(2t_1)^a$, $h_0 = at_1^a$. Тогда

$$t_1^a = \frac{h_{кр}}{a2^a}, \quad h_0 = \frac{h_{кр}}{2^a}.$$

Величина упреждающего допуска

$$Dh = h_{кр} - h_0 = h_{кр} \left(\frac{1}{2^a} - 1 \right).$$

В случае, если $a = 1$, то есть в предположении, что $h(t)$ - линейная функция,

$$Dh = \frac{h_{кр}}{2}.$$

С учетом полученного значения t_2 функция L будет иметь вид:

$$L = \frac{1}{t_1} \left[a_1 \int_0^{t_1} f(t) dt + a_2 \left(t_1 - \int_0^{t_1} t f(t) dt \right) \int_0^{t_1} f(t) dt + \right]$$

$$+ a_3 \int_{t_1}^{\Gamma} f(t)dt + a_2 T_{\delta} \int_{t_1}^{\Gamma} f(t)dt - a_4 \int_0^{2t_1} f(t)dt + a_2 T_{TO} p_2],$$

где в силу стационарности процесса $p_2 = P\{t_i \leq 2t_1 | t_i \leq t_1\} = P\{t_i \leq t_1\} = \int_0^{t_1} f(t)dt$

Кроме того, $a_2(t_1 - \int_0^{t_1} t f(t)dt) = a_2 T_{np}$, где T_{np} - средняя величина простоя оборудования за время t_1 . При этом $T_{np} = kt_1$, ($k < 1$), k - коэффициент, определяемый по статистическим данным. Тогда

$$L = \frac{1}{t_1} [(a_1 + a_2 T_{TO} - a_4) \int_0^{t_1} f(t)dt + (a_3 + a_2 T_{\delta}) \int_{t_1}^{\Gamma} f(t)dt] + ka_2 \int_0^{t_1} f(t)dt.$$

Из условия $L_{t_1} = 0$, с учетом соотношений $\int_0^{t_1} f(t)dt = 1 - e^{-lt_1}$ и

$$\int_{t_1}^{\Gamma} f(t)dt = e^{-lt_1}, \quad \text{получаем}$$

$$t_1 [a_1 + a_2 T_{TO} + a_4] l e^{-lt_1} - (a_3 + a_2 T_{\delta}) l e^{-lt_1} - [a_1 + a_2 T_{TO} + a_4] (1 - e^{-lt_1}) + (a_3 + a_2 T_{\delta}) l e^{-lt_1} + t_1^2 ka_2 l e^{-lt_1} = 0$$

Обозначим $M = a_1 + a_2 T_{TO} + a_4$, $N = a_3 + a_2 T_{\delta}$, $Q = \frac{ka_2}{l}$. Тогда

$$t_1 [M l e^{-lt_1} - N l e^{-lt_1}] - [M(1 - e^{-lt_1}) + N e^{-lt_1}] + (l t_1)^2 Q e^{-lt_1} = 0 \text{ или}$$

$$[(M - N) l t_1 + (M - N)] e^{-lt_1} - M + (l t_1)^2 Q e^{-lt_1} = 0.$$

Полученное соотношение дает возможность оценить оптимальное значение периодичности диагностики t_1 . Для получения приближенных значений t_1 разложим e^{-lt_1} в ряд Маклорена. Если в разложении e^{-lt_1} ограничиться только членами второго порядка, то есть взять $e^{-lt_1} = 1 - l t_1 + \frac{(l t_1)^2}{2} + \overline{O}((l t_1)^2)$, то

$$\text{получим } (M - N)(1 + l t_1)(1 - l t_1 + \frac{(l t_1)^2}{2} + \overline{O}((l t_1)^2)) - M +$$

$+ (l t_1)^2 Q(1 - l t_1 + \frac{(l t_1)^2}{2} + \bar{\sigma}((l t_1)^2)) = 0$. Отбрасывая бесконечно малые порядка выше второго, получим $(M - N)(1 - (l t_1)^2 + \frac{(l t_1)^2}{2}) - M + Q(l t_1)^2 = 0$,

Отсюда $t_1 = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{N}{(N - M)/2 + Q}}$.

Если в разложении сохранить большее число членов, то будем иметь соответствующие уравнения, которые могут быть решены с любой степенью точности.

Выводы. 1. Предложена методика оценки периодичности диагностики технического состояния и работоспособности оборудования с одним параметром технического состояния.

2. Дана оценка величины упреждающего допуска оборудования к дальнейшей эксплуатации в зависимости от значения параметра технического состояния.

3. Если на момент диагностики параметр технического состояния находится в поле упреждающего допуска, оборудование к дальнейшей эксплуатации не может быть допущено.

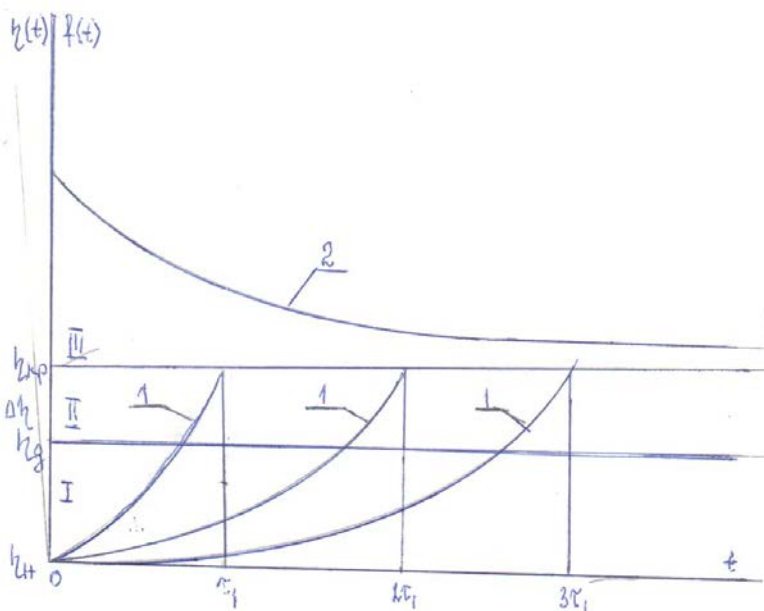


Рис. 1 Изменение параметра технического состояния и плотности
распределения отказов оборудования:

[Источник: Составлено одним из авторов Дубровиным В.М.]

I – область исправного состояния,

II – область технического обслуживания (текущего ремонта),

III – область неработоспособного состояния (капитального ремонта или замены
оборудования)

1- $h(t)$, 2 - $f(t)$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диагностика и техническое обслуживание машин : учебник /А.Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов, А.В. Неговора, А.С. Иванов, 2-е изд. – М. Колос, 2015. 416 с.
2. ГОСТ 27.103-83. Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Основные положения. Москва : Издательство стандартов, 1983, 5с.
3. Дмитриев А.К. Принципы организации гибкой системы эксплуатационного контроля сложных технических объектов // Надежность и контроль качества. 1998. №3. С. 24-32.
4. Дмитриев А.К., Кравченко И.Д. Построение модели процесса диагностирования при использовании непрерывных диагностических признаков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки . 1994. №2. С. 7-14.
5. Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машины. - М.: Машиностроение, 1976. 287 с.

6. Петрухин В.Г., Егоров С.А. Устьянцев Е.В. Использование функций распределения порядковых статистик для оценки надежности технических систем // Надежность и контроль качества. 1998. №3. с. 3-8.
7. Садыхов Г.С., Кузнецов В.И. Методы и модели оценок безопасности сверхназначенных сроков эксплуатации технических объектов. – М. : изд-во ЛКИ, 2007. 144 с.
8. Садыхов Г.С., Кузнецов В.И. Основы выбора безопасных периодов эксплуатации объектов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005, №4. С. 96-99.

Оригинальность 80%