

Технологии и средства механизации

УДК 502/504:631.354.2

А. С. МАТВЕЕВ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный университет природообустройства»

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОВРЕМЕННОЙ РАБОТЫ МАШИН НА НАДЕЖНОСТЬ ЗВЕНА ПАРКА ТЕХНИКИ

Надежность машин определяется временем их работы. Чем меньше это время, тем более надежной оказывается машина. Таким образом, закон распределения времени безотказной работы машины и всего звена парка существенно зависит от того, как долго машины пребывают в нерабочем состоянии, в том числе простаивая. В работе приведены графики вероятностей безотказной работы звена – без простоя машин и при наличии простоев.

Простои, надежность, отказы, парк машин, вероятность безотказной работы.

The reliability of machines is determined by the time of their operation. The less this time, the more reliable is the machine. Thus, the law of time distribution of the faultless machine and the whole link of the fleet depends mainly on how long the machines are in the non-working state including the idle time. There are given probability diagrams of the faultless operation of the link – without and with downtime.

Idle time, reliability, failures, fleet of machines, probability of failure-free operation.

Рассмотрим звено парка машин, состоящее из n экскаваторов-погрузчиков марки Fiat-Kobelco FB 100, имеющих определенные интервалы простоя. Для каждого элемента парка эти интервалы имеют различную продолжительность на периоде τ . При этом время до отказа машины всегда имеет неэкспоненциальное распределение, выражаемое формулой (1).

Оценка надежности такого звена машин осуществляется методами, учитывающими произвольный характер времени до отказа машины. Эти методы рассмотрены в [1].

На периоде τ машины работают неодновременно. Рассмотрим функциони-

рование одной машины. Пусть в интервале времени от a до b машина работает, а вне этого интервала — простаивает. На следующем периоде длительностью τ машина работает в интервале от $\tau + a$ до $\tau + b$ и простаивает вне этого интервала и т. д. Выключение машины не влияет на ее надежность. Пусть $P(t)$ — вероятность безотказной работы машины в случае, когда она работает непрерывно. Оценим ее надежность при условии, что машина может простаивать в заданных интервалах времени. В [1] приведено общее выражение вероятности безотказной работы машины $P_{np}(t)$ при наличии интервалов простоя. Для нашего случая получим:

$$P_{np}(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 < t \leq a; \\ P(t - k(\tau - b + a) - a), & \text{при } k\tau + a < t \leq k\tau + b, k = 0, 1, 2, \dots; \\ P(k(b - a)), & \text{при } (k - 1)\tau + a < t \leq k\tau + a, k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (1)$$

Соотношение (1) определяет новый закон распределения времени работы машины с учетом ее простоя: закон $P_{np}(t)$ имеет на три параметра больше, чем $P(t)$.

Среднее время безотказной работы вычислим на основе формулы (1). Интегрируя $P_{np}(t)$, получим:

$$\begin{aligned} T_{1,np} &= \int_0^{\infty} P_{np}(t) dt = a + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{k\tau+a}^{k\tau+b} P(t - k(\tau - b + a) - a) dt + \\ &+ \sum_{k=0}^{\infty} \int_{(k-1)\tau+b}^{k\tau+a} P(k(b - a)) dt = a + \sum_{k=0}^{\infty} \int_{k(b-a)}^{(k+1)(b-a)} P(t) dt + \\ &+ (\tau - b + a) \sum_{k=0}^{\infty} P(k(b - a)) = \\ &= \int_0^{\infty} P(t) dt + a + (\tau - b + a) \sum_{k=1}^{\infty} P(k(b - a)). \end{aligned}$$

Отсюда

$$T_{1,np} = T_1 + a + (\tau - b + a) \sum_{k=1}^{\infty} P(k(b - a)), \quad (2)$$

где T_1 — среднее время безотказной работы машины в случае ее непрерывной работы.

Для экспоненциального распределения с параметром λ получим:

$$\begin{aligned} T_{1,np} &= \frac{1}{\lambda} + a + (\tau - b + a) \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda k(b-a)} = \\ &= \frac{1}{\lambda} + a + \frac{\tau - b + a}{e^{\lambda(b-a)} - 1}. \end{aligned} \quad (3)$$

Структурная схема расчета надежности изображена на рис. 1. Она состоит из $n = 4$ машин и представляет собой общее резервирование с постоянно включенным резервом.

Время работы машины до отказа является случайным и подчинено экспоненциальному закону распределения с

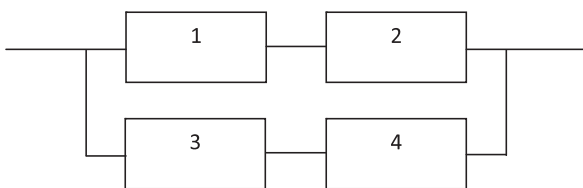


Рис. 1. Схема расчета надежности

параметром $\lambda = 0,002 \text{ ч}^{-1}$. Период работы, состоящий из интервалов работы и простоя каждой машины, $\tau = 10 \text{ ч}$. Время работы машины на каждом периоде приведено в табл. 1.

Таблица 1

Время работы машины

Номер машины	1	2	3	4
Интервал работы	[0; 5]	[2; 3]	[3; 8]	[0; 7]

На остальной части периода τ машины выключены из работы.

Вероятность безотказной работы каждой машины имеет вид $P(t) = e^{-\lambda t}$. Поэтому если все машины звена работают непрерывно, то вероятность безотказной работы звена

$$P(t) = 1 - (1 - e^{-2\lambda t})^2. \quad (4)$$

По формуле (1) найдем вероятность безотказной работы машины с учетом простоя:

$$P_{1,np}(t) = \begin{cases} P(t - 5)k; & \text{при } 10k < t \leq 10k + 5, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \\ P(5k); & \text{при } 10(k - 1) + 5 < t \leq 10k + 5, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

$$P_{2,np}(t) = \begin{cases} 1; & \text{при } 0 < t \leq 2 \\ P(t - 9k - 2); & \text{при } 10k + 2 < t \leq 10k + 3, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \\ P(k); & \text{при } 10(k - 1) + 3 < t \leq 10k + 2, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{3,np}(t) = \begin{cases} 1; & \text{при } 0 < t \leq 5 \\ P(t - 7k - 5); & \text{при } 10k + 5 < t \leq 10k + 8, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \\ P(3k); & \text{при } 10(k - 1) + 8 < t \leq 10k + 5, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{4,np}(t) = \begin{cases} P(t - 3k); & \text{при } 10k < t \leq 10k + 7, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \\ P(7k); & \text{при } 10(k - 1) + 7 < t \leq 10k, \\ & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (8)$$

На основе структурной схемы определим вероятность безотказной работы звена парка машин с учетом их простоя. Вероятность безотказной работы резервированного парка, состоящего из машин 1 и 2, равна произведению вероятностей безотказной работы. Тогда $P_{1,2,пр}(t) = P_{1,пр}(t) \cdot P_{2,пр}(t)$. Вероятность их безотказной работы резервного парка равна $P_{3,4,пр}(t) = P_{3,пр}(t) \cdot P_{4,пр}(t)$. Поэтому вероятность безотказной работы всего парка с учетом времени простоя машин равна:

$$P_{с,пр}(t) = 1 - [1 - P_{1,пр}(t)P_{2,пр}(t)][1 - P_{3,пр}(t)P_{4,пр}(t)]. \quad (9)$$

Таблицу значений и графики вероятностей безотказной работы машин и звена в целом получим в Microsoft Excel [2]. В ячейках A1 : I1 записываются заголовки столбцов; в колонке A — время t , изменяющееся от 0 до 500 ч с шагом 5 ч. В ячейку B2 записывается отношение текущего времени работы машин к периоду $\tau = 10$:

$$B2 = A2/10.$$

В ячейку C2 помещается значение k как целое от отделения t на τ :

$$C2 = ЦЕЛОЕ(B2).$$

В ячейках D2 : G2 содержатся формулы (5)...(8) для вычисления вероятностей безотказной работы машин:

$$D2 = \text{ЕСЛИ}(B2 \leq C2 + 0,5; \text{EXP}(-0,002 \cdot (A2 - 5 \cdot C2));$$

$$\text{EXP}(-0,002 \cdot 5 \cdot (C2 + 1))),$$

$$E5 = \text{ЕСЛИ}(B5 > C5 + 0,2 \ \& \ B5 \leq C5 + 0,3;$$

$$\text{EXP}(-0,002 \cdot (A5 - 9 \cdot C5 - 2)); \text{EXP}(-0,002 \cdot (C5 + 1))),$$

$$F8 = \text{ЕСЛИ}(B8 > C8 + 0,5 \ \& \ B8 \leq C8 + 0,8;$$

$$\text{EXP}(-0,002 \cdot (A8 - 7 \cdot C8 - 5));$$

$$\text{EXP}(-0,002 \cdot 3 \cdot (C8 + 1))),$$

$$G2 = \text{ЕСЛИ}(B2 \leq C2 + 0,7;$$

$$\text{EXP}(-0,002 \cdot (A2 - 3 \cdot C2));$$

$$\text{EXP}(-0,002 \cdot 7 \cdot (C2 + 1))).$$

Для второй и третьей машин расчетные формулы записывают, начиная с ячеек E5 и F8, поскольку в предыдущих ячейках значения функций равны единице.

Ячейки H2 и I2 содержат формулы (9) и (4) для вычисления вероятностей безотказной работы всего звена парка при наличии и отсутствии интервалов простоя машин:

$$H2 = 1 - (1 - D2 \cdot E2) \cdot (1 - F2 \cdot G2),$$

$$I2 = 1 - (1 - \text{EXP}(-0,004 \cdot A2)) \cdot 2.$$

Затем полученные формулы «протягиваются» на весь блок рассчитываемых ячеек. Результаты табулирования функций содержатся в табл. 2.

Таблица 2

Расчет вероятностей безотказной работы машин и звена парка

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	t	$t/10$	k	$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$P_{с,пр}$	P_c
2	0	0	0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1	1
3	5	0,5	0	0,99005	1,00000	1,00000	0,99005	0,999901	0,999608
4	10	1,0	1	0,99005	1,00000	1,00000	0,98610	0,999862	0,998463
...
101	490	49,5	49	0,60653	0,90484	0,74082	0,49858	0,715460	0,257075
102	500	50,0	50	0,60653	0,90303	0,73639	0,49659	0,713106	0,252355

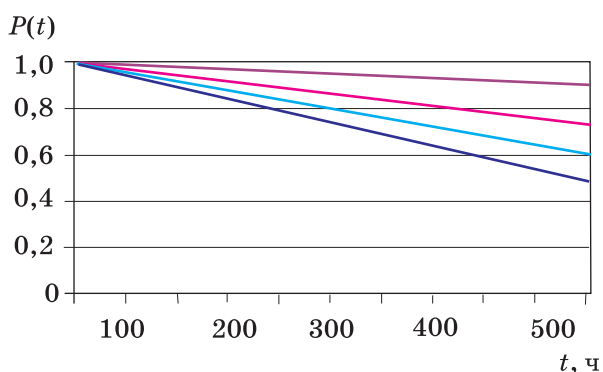


Рис. 2. Вероятность безотказной работы машин: — $P1$; — $P2$; — $P3$; — $P4$

Графическая иллюстрация таблицы приведена на рис. 2 и 3. На рис. 2 показаны графики вероятностей безотказной работы машин.

Обратим внимание на то, что надежность машин по критерию $P(t)$ определяется временем их работы. Чем меньше это время, тем более надежной оказывается машина. Самым надежным является вторая машина, работающая на периоде 1 ч, третья машина работает 3 ч, первая машина — 5 ч, а четвертая — 7 ч.

На рис. 3 приведены графики вероятностей безотказной работы звена: без простоя машин и при наличии простоев.

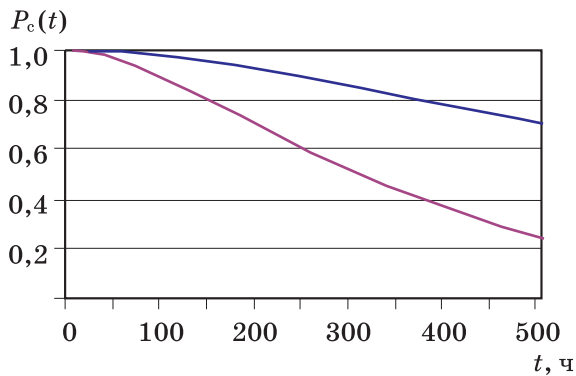


Рис. 3. Вероятность безотказной работы звена парка машин для случаев непрерывной и неодновременной их работы (без учета и с учетом времени их простоя): — $P_c(t)$; — $P_{c,пр}(t)$

Из графиков следует, что $P_c(t)$ значительно меньше, чем $P_{c,пр}(t)$, т. е. наличие простоя у машин повышает надежность парка.

Вычислим среднее время безотказной работы каждой машины и всего звена парка. Среднее время безотказной работы машин без учета времени простоя

$$T_1 = \frac{1}{\lambda} = 500 \text{ ч.}$$

Используя формулу (4), найдем среднее время безотказной работы звена без учета времени простоя машины:

$$\begin{aligned} T_{1,c} &= \int_0^{\infty} P_c(t) dt = \int_0^{\infty} \left(1 - (1 - e^{-2\lambda t})^2\right) dt = \\ &= \int_0^{\infty} (2e^{-2\lambda t} - e^{-4\lambda t}) dt = \\ &= \frac{2}{2\lambda} - \frac{1}{4\lambda} = \frac{3}{4\lambda} = 375 \text{ ч.} \end{aligned}$$

Среднее время безотказной работы машин с учетом времени их простоя определим из соотношения (3):

$$T_{1,пр} = \frac{1}{\lambda} + \frac{5}{e^{5\lambda} - 1} = 500 + \frac{5}{e^{5 \cdot 0,002} - 1} = 997,5 \text{ ч;}$$

$$T_{2,пр} = \frac{1}{\lambda} + 2 + \frac{9}{e^{\lambda} - 1} = 502 + \frac{9}{e^{0,002} - 1} = 4997,5 \text{ ч;}$$

$$T_{3,пр} = \frac{1}{\lambda} + 5 + \frac{7}{e^{3\lambda} - 1} = 505 + \frac{7}{e^{3 \cdot 0,002} - 1} = 1668,2 \text{ ч;}$$

$$T_{4,пр} = \frac{1}{\lambda} + \frac{3}{e^{7\lambda} - 1} = 500 + \frac{3}{e^{7 \cdot 0,002} - 1} = 712,8 \text{ ч.}$$

Среднее время безотказной работы звена парка с учетом времени простоя машин определим на основе табличных данных по формуле трапеций:

$$T_{c,пр} \approx 1030 \text{ ч.}$$

Выводы

Закон распределения времени безотказной работы машин и всего звена парка существенно зависит от того, как долго машины пребывают в нерабочем состоянии, в том числе простаивая.

Надежность звена парка в целом по вероятности $P(t)$ значительно выше, если на определенных интервалах времени машины простаивают, причем с течением времени разница $P_{пр}(t) - P(t)$ будет увеличиваться.

Наличие интервалов простоя машин повышает среднее время безотказной работы звена, которое в нашем случае увеличилось почти в 3 раза.

1. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности: практикум. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.

2. **Курицкий Б. Я.** Поиск оптимальных решений средствами Excel 7.0. – СПб: ВNHV-Санкт-Петербург, (1997). – 384 с.

Материал поступил в редакцию 19.04.10.

Матвеев Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология металлов и ремонта машин»

Тел. 8 (499) 976-45-25

E-mail: msuee-priem@yandex.ru