

АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ «МОСКВА–2020» МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА



Д.С. Шутов



И.И. Лакин

Важную роль в перевозочном процессе Московского метрополитена составляет надежность оборудования эксплуатируемых вагонов. Состояние оборудования моторвагонного подвижного состава напрямую влияет на безопасность движения поездов и интервал их попутного следования, ведь отказ оборудования влечет за собой отправку подвижного состава в внеплановый ремонт и уменьшение количества одновременно эксплуатируемых поездов на линии.

Ключевые слова: показатели надежности, моторвагонный подвижной состав, отказы оборудования, показатели безотказности

EDN: YSCVGQ

Целью исследования является повышение надежности оборудования самых современных на Московском метрополитене вагонов моделей 81-775/776/777 «Москва–2020» (рис. 1). Это позволит уменьшить количество сбоев в графике движения поездов и уменьшить непредвиденные расходы на внеплановый ремонт.

Для указанной модели вагонов рассматривались зарегистрированные отказы по всем электродепо Московского метрополитена. Используемые в статье методы дают возможность определить узлы подвижного состава, которые требуют модернизации.

Проведенное исследование позволяет получить наглядное представление о надежности узлов и определить наиболее частые причины отказов, что позво-

лит принять меры по исключению выхода из строя оборудования подвижного состава [1].

Используемые методы

Проведен анализ сводки Метрополитена по случаям отказов вагонов в период с 01.01.2020 по 31.12.2021 (табл. 1).

На первоначальном этапе построена диаграмма отказов оборудования (рис. 2).

Наибольшее количество отказов указанных вагонов составляет дверное оборудование, которое оказывает непосредственное влияние на качество обслуживания пассажиров Московского метрополитена. Распределение отказов дверного оборудования представлено в табл. 2.

Шутов Денис Сергеевич, аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), и.о. начальника производственно-технического отдела ГУП «Московский метрополитен» электродепо «Замоскворецкое». Область научных интересов: подвижной состав железных дорог, надежность, метрополитен, модернизация подвижного состава, техническое обслуживание и ремонт. Автор 10 научных работ, в том числе одного учебного пособия.

Лакин Игорь Игоревич, кандидат технических наук кафедры «Электропоезда и локомотивы» Института транспортной техники и систем управления Российского университета транспорта (ИТТСУ РУТ (МИИТ)), руководитель направления дирекции по контролю качества эксплуатации подвижного состава АО «Трансмашхолдинг» (ТМХ). Область научных интересов: подвижной состав железных дорог, надёжность, бортовая диагностика, АСУ, мониторинг технического состояния, техническое обслуживание и ремонт. Автор 39 научных работ. Имеет два патента на изобретения.



Рис. 1. Состав из вагонов моделей 81-775/776/777

Для контроля качества деталей подвижного состава проведен анализ Парето [2], который показывает, что наибольшее количество отказов дверного оборудования связано с неисправностями блоков управления дверьми (БУД). Анализ Парето представлен на рис. 3.

Осуществлен подбор составов, которые имели место отказа БУД со снятием состава с линии, после которого замена изделия (БУД) на вагоне не производилась. Это необходимо для наблюдения за конкретным БУД и анализа величин пробега, на которых производилось его восстановление (замена программного обеспечения (ПО), восстановление контакта в разъемах и т.д.). Количество подобранных составов составляет $N=10$.

Наработка от начала эксплуатации состава до проведения планового обслуживания БУД в объеме ТО — $t=43000$ км (максимальный пробег при объеме ТО).

Данные по наступлению моментов отказа БУД для десяти отобранных составов представлены в табл. 3.

Построены процессы восстановления каждого состава отдельно и объединенный процесс восстановления (рис. 4).

Средний пробег БУД на отказ определен по формуле (1):

$$T^* = \frac{t}{\bar{m}(t)}, \quad (1)$$

где $\bar{m}(t)$ — среднее значение повторных отказов приходящихся на один БУД, определяется по формуле (2):

$$\bar{m}(t) = \frac{\sum m_i(t)}{N}, \quad (2)$$

где $m_i(t)$ — количество отказов до проведения планового ТО.

Для определения среднего количества отказов, приходящихся на один БУД, произведен расчет по формуле (3):

$$\bar{m}(t) = \frac{33}{10} = 3,3. \quad (3)$$

Далее произведен расчет средней наработки БУД на отказ по формуле (4):

$$T^* = \frac{42060}{3,3} = 12745 \text{ км}. \quad (4)$$

С целью проведения анализа отказов БУД:

1. Пробег, на котором произошли случаи отказа БУД (33 рассматриваемых отказа) распределен по возрастанию t .

2. Рассчитан шаг между рассматриваемыми отказами dt .

3. Рассчитано математическое ожидание m^* при каждом пробеге.

4. Отказы распределены по интервалам пробега с шагом 4300 км (Δt) (от 0 до 43000 км).

5. Указано количество попаданий отказов Δm между интервалами пробега.

Результаты расчета распределения моментов отказа БУД по интервалам пробега сведены в табл. 4.

Определено множество точек математического ожидания m^* на интервале пробега от 0 до 43000 км (между проведениями технического обслуживания в объеме ТО) с шагом 430 км (табл. 5).

На основании табл. 5 построена эмпирическая функция восстановления (рис. 5). Аппроксимация эмпирической функции восстановления теоретической позволяет получить характеристику процесса восстановления [3] БУД $H(t)$. Аппроксимацию проведем до 5 степени уравнения для получения наиболее приближенной теоретической характеристики к эмпирической. Эмпирическая и теоретическая функции восстановления представлены на рис. 6.

После проведения аппроксимации получена полиномиальная линия, которая соответствует уравнению (формула (5):

$$H(t) = -3 \cdot 10^{-9} \cdot x^5 + 7 \cdot 10^{-7} \cdot x^4 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot x^3 + 0,0009 \cdot x^2 + 0,0466 \cdot x + 0,1392. \quad (5)$$

Статистический параметр потока отказов [2] определен по формуле (6):

$$\omega_i^*(\Delta t) = \frac{\Delta m}{N \cdot \Delta t}, \quad (6)$$

где Δm — количество отказов БУД в каждом из интервалов пробега;

N — количество составов (БУД);

Δt – заданный интервал пробега, тыс.км.

Теоретический параметр потока отказов определен от производной [4] $H(t)$ (формула (7):

$$\omega_i(t) = \frac{dH(t)}{dt} = -15 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 28 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 - 15 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 0,0018 \cdot x + 0,0466. \quad (7)$$

Функция плотности распределения пробега БУД до отказа вычислена по интегральному уравнению Вольтерра [5] (формула (8):

$$f_j = \frac{\omega_j \left(1 - \frac{\Delta f_0}{2} \right) - \Delta \cdot \sum_{i=1}^{j-1} (\omega_i f_{j-i})}{1 + \frac{\Delta \cdot \omega_0}{2}}. \quad (8)$$

Таблица 1

Отказы вагонов моделей 81-775/776/777

Группа оборудования	Количество отказов	Количество отказов, %
Дверное оборудование	227	25%
Прочее	198	22%
Электрическое оборудование	128	14%
САУ	88	10%
ЦИС	66	7%
Пневматическое оборудование	58	6%
КАТП	46	5%
АСОТП	23	3%
Видеооборудование	16	2%
Противоюзная система	14	2%
СОК ВМ	12	1%
АСНП	9	1%
Механическое оборудование	8	1%
Радиооборудование	6	1%
Всего	899	100%

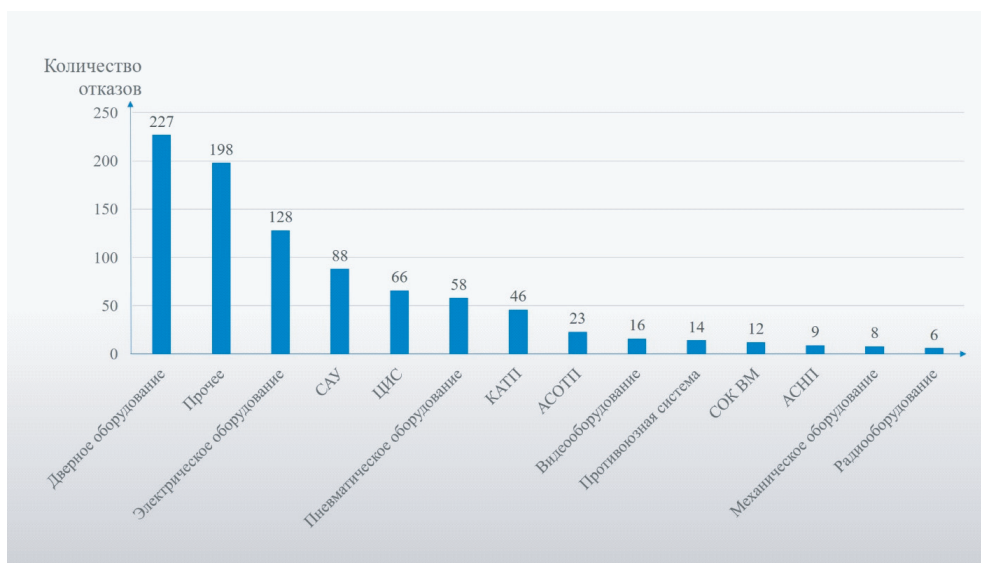


Рис. 2. Диаграмма отказов вагонов моделей 81-775/776/777

Вероятность отказа (формула (9):

$$Q(t) = \int_0^t f(t) \cdot dt \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы (формула (10):

$$P(t) = 1 - Q(t) \quad (10)$$

Интенсивность отказа (формула (11):

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} \quad (11)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 6.

Рассчитанные данные позволяют произвести построение зависимостей, приведенных на рис. 7–9.

Выводы

Из графика зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от пробега (см. рис. 9) видно, что при достижении составом «Москва» пробега 12900 км вероятность отказа БУД составляет 0,452 (45,2%).

После анализа табл. 4 видно, что в интервале пробега от 0 до 12900 км количество попаданий Δm отказов составляет 15 шт. из всех 33 проанализированных отказов (45,4%), что соответствует рассчитанной и изображенной на рис. 8 вероятности отказа.

Анализ отказов БУД показал, что наиболее частой причиной неисправности блоков явилась неисправность программного обеспечения (табл. 7).

Все это указывает на низкую надежность БУД и требует проведения технических мероприятий.

1. Повышение надежности за счет замены ПО [6] по причине наибольшего числа отказов, связанных со сбоем ПО.

2. Обращение в адрес завода-изготовителя с целью проведения им мероприятий и модернизаций, направленных на повышение надежности указанных блоков.

3. Проведение дополнительных работ при плановых обслуживании и ремонтах блоков БУД.

Выполнение указанных мероприятий имеет большое значение для их применения подрядными организациями Московского метрополитена и позволит в значительной мере уменьшить количество отказов оборудования подвижного состава [7].

Таблица 2

Причины отказов дверей и дверного оборудования

Причина отказа	Количество отказов	Количество отказов, %	Нарастающий итог, %
Блок управления дверьми	73	32,2	32,2
Нарушение регулировки проема	48	21,1	53,3
Привод дверей	44	19,4	72,7
Концевые выключатели	29	12,8	85,5
Двери кабины машиниста	19	8,4	93,8
Аварийные выключатели	9	4,0	97,8
Системы управления дверьми	2	0,9	98,7
Воздействие пассажиров	2	0,9	99,6
Датчик положения дверей	1	0,4	100,0
Всего	227	100,0	100,0

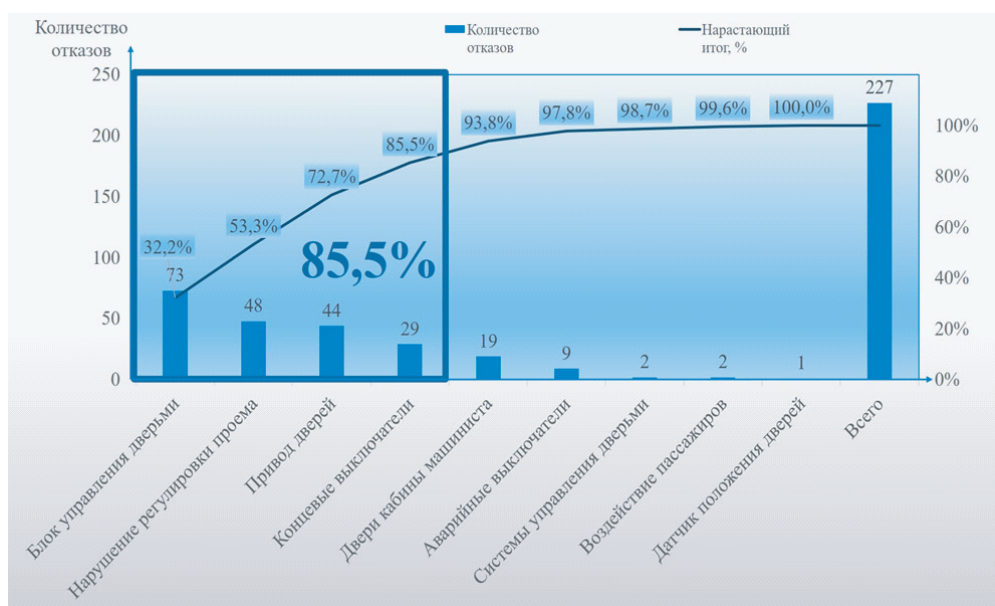


Рис. 3. Диаграмма Парето причин отказов дверей и дверного оборудования

Таблица 3

Распределение пробегов от начала эксплуатации до ТО по отказам БУД

№ состава	Количество отказов	Момент наступления отказа БУД, км				
		1	2	3	4	5
75141–75142	4	1100	4600	5540	10830	—
75017–75018	2	27500	30730	—	—	—
75025–75026	4	80	850	12800	29600	—
75027–75028	1	950	—	—	—	—
75037–75038	2	1340	8600	—	—	—
75069–75070	4	5800	37300	39540	42060	—
75091–75092	2	13870	31950	—	—	—
75107–75108	4	880	5530	7200	13280	—
75113–75114	5	15540	19430	28430	32790	37830
75119–75120	5	11740	19060	24060	28750	33340
Всего отказов	33					

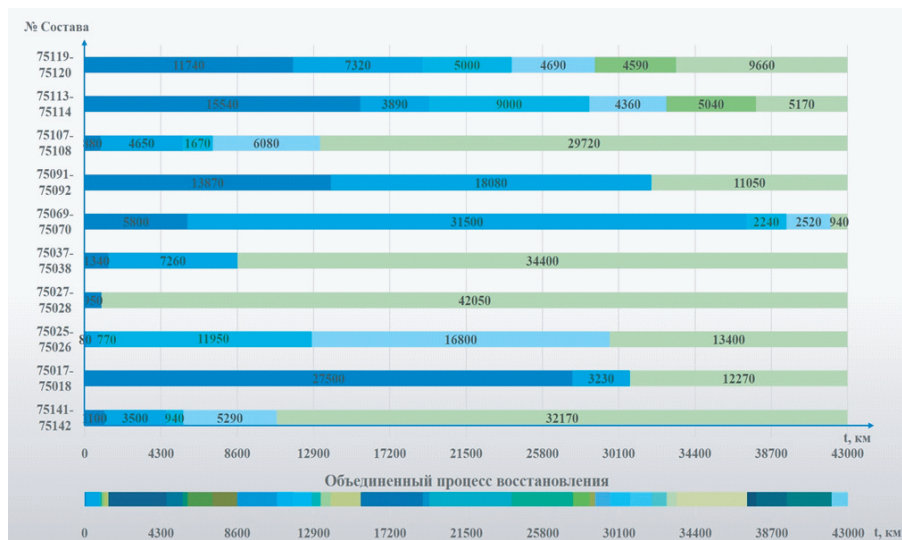


Рис. 4. График процессов восстановления каждого состава и объединенного процесса восстановления

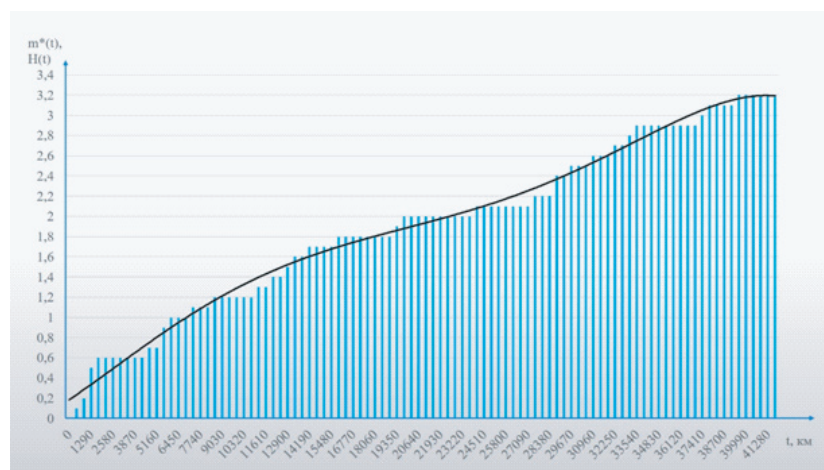


Рис. 5. Эмпирическая функция восстановления

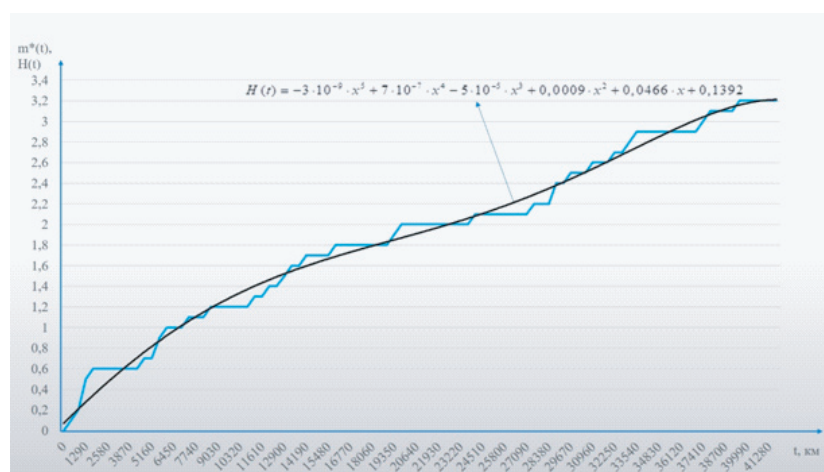


Рис. 6. Эмпирическая и теоретическая функции восстановления

Таблица 4

Распределение моментов отказа БУД по интервалам пробега

n	t	dt	m^*	Δt	Δm
1	80	80	0,1	0–4300	6
2	850	770	0,2		
3	880	30	0,3		
4	950	70	0,4		
5	1100	150	0,5		
6	1340	240	0,6		
7	4600	3260	0,7	4300–8600	6
8	5530	930	0,8		
9	5540	10	0,9		
10	5800	260	1		
11	7200	1400	1,1		
12	8600	1400	1,2		
13	10830	2230	1,3	8600–12900	3
14	11740	910	1,4		
15	12800	1060	1,5		
16	13280	480	1,6	12900–17200	3
17	13870	590	1,7		
18	15540	1670	1,8		
19	19060	3520	1,9	17200–21500	2
20	19430	370	2		
21	24060	4630	2,1	21500–25800	1
22	27500	3440	2,2	25800–30100	4
23	28430	930	2,3		
24	28750	320	2,4		
25	29600	850	2,5		
26	30730	1130	2,6	30100–34400	4
27	31950	1220	2,7		
28	32790	840	2,8		
29	33340	550	2,9		
30	37300	3960	3	34400–38700	2
31	37830	530	3,1		
32	39540	1710	3,2	38700–43000	2
33	42060	2520	3,3		

Таблица 5

Расчет математического ожидания

t	m^*
0	0,1
430	0,2
860	0,3
1290	0,5
1720	0,6
...	...
39990	3,2
40420	3,2
40850	3,2
41280	3,2
41710	3,2

Таблица 6

Результаты расчетов

i	t км	Δt	Δm	$\omega^*(t)$	$\omega^*_{ср}$	$\omega(t)$ 1/тыс. км	$f(t)$ 1/тыс. км	$F(t)$	$P(t)$	$\lambda(t)$ 1/тыс. км
0	0	—	—	—	—	0,0466	0,0466	0	1	0,04660
1	4300	0–4300	6	0,139535	0,076744	0,051783991	0,038118969	0,182	0,818	0,04660
2	8600	4300–8600	6	0,139535	0,076744	0,052684906	0,031181449	0,33	0,67	0,04654
3	12900	8600–12900	3	0,069767	0,076744	0,050453845	0,025506528	0,452	0,548	0,04654
4	17200	12900–17200	3	0,069767	0,076744	0,046118835	0,020864418	0,552	0,448	0,04657
5	21500	17200–21500	2	0,046512	0,076744	0,040584824	0,017067152	0,633	0,367	0,04650
6	25800	21500–25800	1	0,023256	0,076744	0,034633684	0,013960973	0,7	0,3	0,04654
7	30100	25800–30100	4	0,093023	0,076744	0,028924211	0,011420105	0,754	0,246	0,04642
8	34400	30100–34400	4	0,093023	0,076744	0,023992122	0,009341664	0,799	0,201	0,04648
9	38700	34400–38700	2	0,046512	0,076744	0,020250058	0,00764149	0,836	0,164	0,04659
10	43000	38700–43000	2	0,046512	0,076744	0,017987585	0,006250741	0,866	0,134	0,04665

Таблица 7

Причины отказа БУД

Причина отказа	Количество отказов
Неисправность ПО	29
Неустановленные причины, выявляемые на заводе	19
Потеря контакта в разъемах	14
Неисправность реле 30К2	3
Короткое замыкание	1
Всего	66



Рис. 7. Зависимость параметра потока отказов от пробега

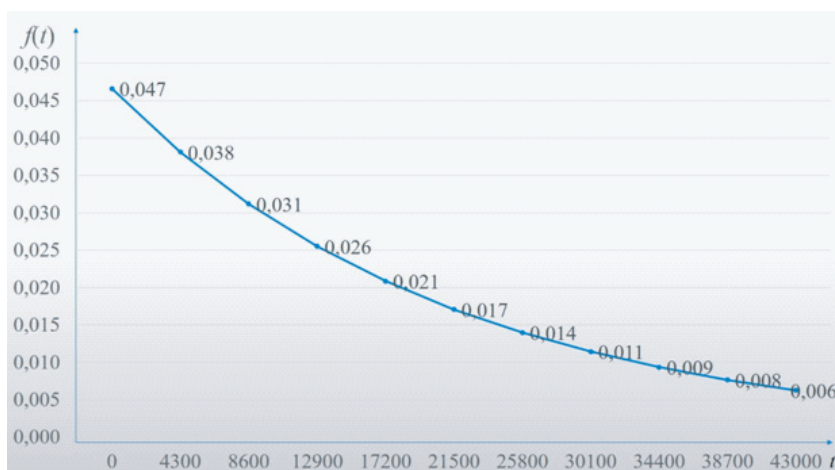


Рис. 8. График зависимости плотности распределения пробега до отказа от пробега

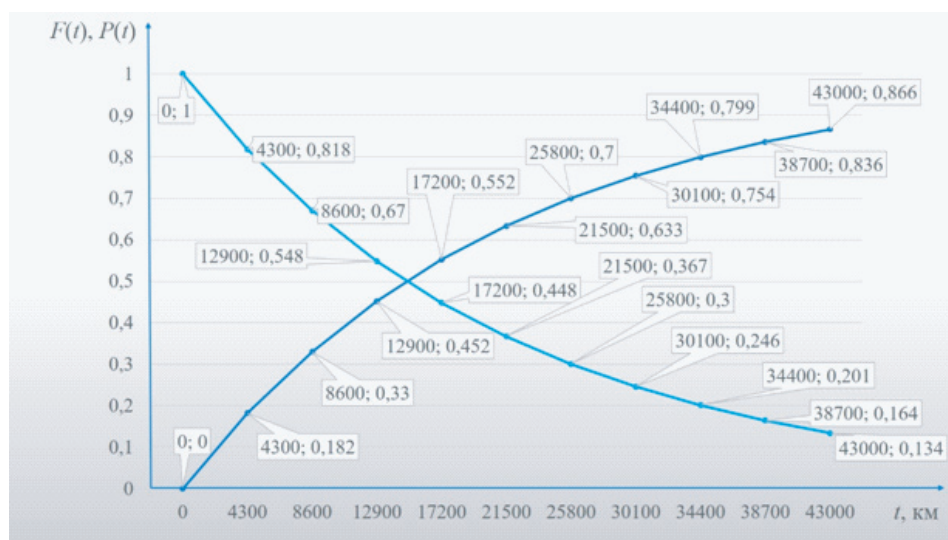


Рис. 9. График зависимости вероятности безотказной работы и вероятности отказа от пробега

Литература

1. Шутов, Д.С. Методика расследования, учета и предупреждения неисправностей электропоездов Московского метрополитена на примере вагонов моделей 81-740/741 «Русич» / Д.С. Шутов, И.К. Лакин. — Текст: непосредственный. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. — 2022. — №1. — С. 40–45.
2. Воробьев, А.А. Расчет показателей надежности тягового подвижного состава. Ч.1. Расчет показателей надежности: учебное пособие / А.А. Воробьев, А.В. Горский, А.В. Скребков, Д.С. Шутов; — Москва: РУТ (МИИТ), 2020. — 165 с. — Текст: непосредственный.
3. Русев, В.Н. Аппроксимации функции восстановления и стратегия управления эксплуатационными затратами / В.Н. Русев, А.В. Скориков. — Текст: непосредственный. // Проблемы управления. — 2018. — №4. — С. 28–35.
4. Краковский, Ю.М. Вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов многокомпонентного оборудования / Ю.М. Краковский, З.Д. Нго. — Текст: непосредственный. // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2015. — №10. — С. 16–21.
5. Скребков, А.В. Определение оптимальной структуры ремонтного цикла электровозов в конкретных условиях эксплуатации: специальность 05.22.07 «Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Скребков Алексей Валентинович; РУТ (МИИТ). — Москва, 2004. — 24 с. — Библиогр.: с. 24. — Место защиты: РУТ (МИИТ). — Текст: непосредственный.
6. Наумов, А.А. Надежность программного обеспечения и методы ее повышения / А.А. Наумов, А.Р. Айдинян. — Текст: непосредственный. // Инженерный вестник Дона. — 2018. — №2. — С. 98.
7. Безопасность движения и метод повышения надежности предупреждения отказов технических средств по сектору автоматика и телемеханика / С.С. Промышова. — Текст: непосредственный. // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. — 2019. — №3 С. 1–10. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41805308&-ysclid=17ip43suz2704069734> (дата обращения: (01.09.2022).