

DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-3-309

УДК 621.001.4



Научная статья | Эксплуатация автомобильного транспорта

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПО ОБЪЕКТАМ И ВИДАМ РАБОТ С УЧЕТОМ ИХ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В.И. Карагодин

При планировании работы наземных транспортных и транспортно-технологических средств недостаточно учитывается их техническое состояние. Это может привести к незапланированному выходу машин из строя и невыполнению запланированных работ оставшимися машинами.

Предлагаемые методы распределения машин по объектам и видам работ основаны на теории старения машин, но в отличие от потенциала работоспособности машин, который отражает техническое состояние среднестатистической машины, ориентированы на конкретную машину, вероятность отказа которой определяется с помощью методов технического диагностирования.

Приведены результаты исследования зависимости вероятности отказа автомобиля от величины межконтрольного периода, закономерностей изменения вероятности отказа в течение межконтрольного периода и с увеличением пробега автомобиля. Предложены математическая модель и методика распределения машин по объектам и видам работ с учетом их технического состояния.

Цель – повышение эффективности использования наземных транспортных и транспортно-технологических средств.

Метод и методология проведения работы. Теория старения машин, математическое моделирование, статистические методы анализа.

Результаты. Получены и обоснованы новые зависимости вероятности отказа автомобиля от величины межконтрольного периода, закономерности изменения вероятности отказа в течение межконтрольного периода и с увеличением пробега автомобиля.

Область применения результатов: эксплуатация наземных транспортных и транспортно-технологических средств.

Ключевые слова: транспортные средства; транспортно-технологические средства; техническое состояние; потенциал работоспособности; диагностический параметр; вероятность отказа; виды работ; распределение машин

Для цитирования. Карагодин В.И. Распределение наземных транспортных и транспортно-технологических средств по объемам и видам работ с учетом их технического состояния // *International Journal of Advanced Studies*. 2024. Т. 14, № 3. С. 77-99. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-3-309

Original article | Operation of Road Transport

DISTRIBUTION OF LAND TRANSPORT AND TRANSPORT-TECHNOLOGICAL MEANS BY OBJECTS AND TYPES OF WORK, TAKING INTO ACCOUNT THEIR TECHNICAL CONDITION

V.I. Karagodin

When planning the operation of land transport and transport technology facilities, their technical condition is not sufficiently taken into account. This can lead to unplanned failure of the machines and failure of the planned work by the remaining machines.

The proposed methods of distributing machines by objects and types of work are based on the theory of aging of machines, but unlike the performance potential of machines, which reflects the technical condition of an average machine, they are focused on a specific machine,

the probability of failure of which is determined using technical diagnostic methods.

The results of the study of the dependence of the probability of failure of the car on the value of the inter-control period, the patterns of change in the probability of failure during the inter-control period and with an increase in the mileage of the car are presented.

The goal is to increase the efficiency of the use of ground transportation and transportation technology facilities.

Method and methodology. *The theory of aging of machines, mathematical modeling, statistical methods of analysis.*

Results. *New dependences of the probability of a car failure on the value of the inter-control period, the regularity of the change in the probability of failure during the inter-control period and with an increase in the mileage of the car are obtained and justified.*

The field of application of the results *is the operation of ground transportation and transportation technology facilities.*

Keywords: *transport means; transport-technological means; technical condition; working capacity; diagnostic parameter; probability of failure; types of work; distribution of tires*

For citation. *Karagodin V.I. Distribution of Land Transport and Transport-Technological Means by Objects and Types of Work, Taking into Account their Technical Condition. International Journal of Advanced Studies, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 77-99. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-3-309*

Введение

При удовлетворении потребности различных предприятий в транспортных и транспортно-технологических средствах, как правило, выделяются те машины, которые свободны от других работ или освобождаются к моменту возникновения потребности в них. Степень важности предстоящих работ, ответственности за полноту и сроки выполнения задания при этом не учитывается. А машины находятся в разном техническом состоянии, вероятности

их безотказной работы и соблюдения сроков работ разные. Это требует более гибкого подхода к распределению машин по объектам и видам работ с учетом их технического состояния.

Потенциал работоспособности машин и закономерности его изменения

План (план-график) ТО и ремонта машин должен предусматривать равномерный выход машин в ремонт, что позволяет поддерживать на стабильном уровне производительность парка машин. Однако это осложняется зависимостью периодичности выхода машин в ремонт от их технического состояния. Изучению происходящих при этом процессов посвящена теория старения машин, разработанная А.И. Селивановым [11] и получившая дальнейшее развитие в трудах А.М. Шейнина [12] и Л.В. Дехтеринского [1-3].

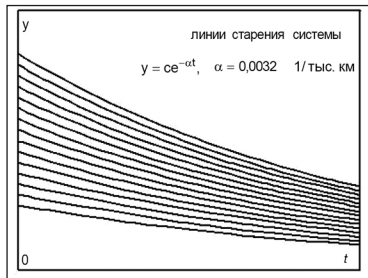


Рис. 1. Семейство линий старения

Л.В. Дехтеринский предлагает рассматривать состояние автомобиля (системы) как результат одновременно протекающих процессов его старения и восстановления [3]. Оценивать состояние автомобиля предусмотрено обобщенным параметром – характеристикой уровня его работоспособности [2]. В качестве такой характеристики рассматривается случайная функция времени $\Pi(t)$, которая получила название потенциала работоспособности системы. При этом под временем t понимается не календарное

время, а наработка в тыс. км. При таком подходе ремонтным воздействиям соответствуют моменты, а не промежутки времени, так как любой простой не сопровождается ростом наработки.

Чистый процесс старения рассматривается как движение точки вдоль некоторой линии старения (рис. 1).

Если на участке $0 < t < t^*$ рассматриваемая система не подвергается ремонтным воздействиям, то потенциал работоспособности системы представляется в виде

$$\Pi(t) = \Pi_0 F(t), \quad 0 < t < t^*, \quad (1)$$

где Π_0 – потенциал работоспособности новой системы;

$F(t)$ – функция, задающая изменение Π_0 во времени.

Если положить, что $\Pi_0 = 1000$, то потенциал работоспособности системы будет выражаться в промилле. Потенциал работоспособности может измеряться и в тыс. км, и в машино-часах, и в рублях, и т.п. А может быть и безразмерной величиной [10]. Если в момент $t = t_k$ на систему оказано ремонтное воздействие, то это обуславливает переход (скачок) в момент $t = t_k$ на новую (более высокую) линию старения (рис. 2).

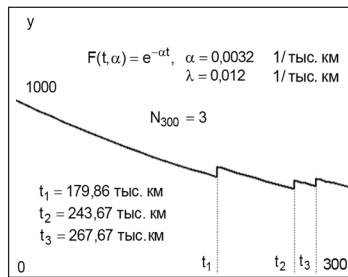


Рис. 2. Случайная реализация потенциала работоспособности системы

Таким образом, потенциал работоспособности системы – это динамический показатель технического состояния системы, выражающий в принятых единицах измерения уровень ее работоспособности в момент t относительно работоспособности новой системы.

В работе [1] подчеркивается, что прогнозное моделирование изменения даже отдельных характеристик конкретного автомобиля невозможно, однако построение моделей, связанное с изучением «поведения» среднего (усредненного) автомобиля и его составных частей, дает возможность обнаружить общие закономерности, относящиеся к поведению всех автомобилей и позволяющие тем самым указать определенные рекомендации относительно выбора стратегии их восстановления и др. Исходя из этого, в работе [1] отказываются от изучения индивидуального конкретного автомобиля и сосредотачивают внимание на среднем автомобиле, представляющем большое число автомобилей рассматриваемого класса.

Такой подход, позволяющий выбирать стратегии восстановления для совокупности автомобилей и их составных частей, обладает теоретической и практической ценностью. Однако не менее важны теоретические разработки и практические рекомендации в отношении конкретного автомобиля. Вывод о невозможности моделирования изменения отдельных характеристик конкретного автомобиля справедлив при отсутствии методов и средств диагностирования технического состояния автомобилей и их составных частей. В противном случае прогнозное моделирование характеристик конкретного автомобиля и его составных частей вполне возможно и востребовано практикой технической эксплуатации подвижного состава [7].

Динамика диагностических параметров в межконтрольные периоды

Пусть диагностический параметр диагностируется с заданной периодичностью в моменты t_1, t_2, \dots (рис. 3). При проведении ТО или ремонта диагностический параметр так же, как и потенциал работоспособности, переходит с линии 1 на новую (более высокую или более низкую) линию 2. Если ТО или ремонт не выполнены, параметр продолжит рост (снижение) и к моменту его очередного контроля t_4 может произойти отказ.

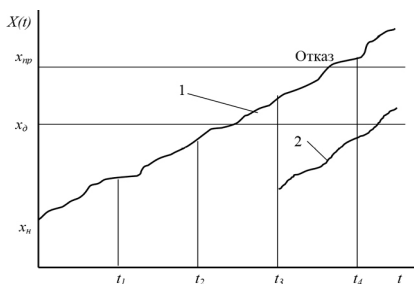


Рис. 3. Характер изменения параметра; x_n – номинальное значение параметра, x_o – допустимое, x_{np} – предельное значения параметра

Вероятность отказа зависит от многих факторов, в том числе от периодичности ТО и ремонтов, при которых производится контроль технического состояния машины или ее составной части. В межконтрольный период сохраняется вероятность отказа, который может быть вызван ошибками диагностирования, несовершенством методов диагностирования или причинами, не зависящими от правильности постановки диагноза. С целью определения вероятностей отказов в межконтрольные периоды была собрана информация о прохождении автомобилями КИА бизнес-класса планового технического обслуживания, установленного заводом-изготовителем (табл. 1 [6, 7]), и последующих отказах, наступивших в межконтрольные периоды.

Таблица 1.

Фрагмент графика установленного планового технического обслуживания

Контролируемые системы и элементы	Пробег, тыс. км								
	1	10	20	30	40	50	60	70	80
Тормозная система			1		1		1		1
Несущая система					1				1
Сцепление		1	1	1	1	1	1	1	1
Коробка передач	1				1				1
Двигатель	1		1		1		1		1
Электрооборудование		1	1	1	1	1	1	1	1

Вероятность отказа составной части автомобиля в межконтрольный период определялась как частное от деления числа от-

казов на общее количество автомобилей, прошедших плановое техническое обслуживание в начале рассматриваемого межконтрольного периода и доработавших до конца этого периода:

$$P_o(l_i) = \frac{n(l_i)}{A(l_i)}, \quad (1)$$

где $n(l_i)$ – число отказов рассматриваемой составной части автомобиля в межконтрольный период l_i ;

$A(l_i)$ – общее количество автомобилей, прошедших плановое техническое обслуживание и диагностирование в начале межконтрольного периода l_i и проработавших до конца этого периода.

Вероятность отказа автомобиля в целом определяется вероятностями отказа продиагностированных составных частей и вероятностями отказа составных частей, не проходящих диагностирования. Вероятности отказа составных частей, не проходящих диагностирования, определяются по формулам соответствующего закона распределения. При законе Вейбулла формула имеет вид

$$P_o(l_i) = 1 - e^{-(l_i/a)^b}, \quad (2)$$

где a и b – параметры распределения Вейбулла, а вероятность $P_{oa}(t_i)$ отказа автомобиля в целом определяется по формуле

$$P_{oa}(t_i) = 1 - \prod_{j \in H} [1 - P_{oj}(t_i)] \cdot \prod_{j \in D} [1 - P_{oj}(l_i)], \quad (3)$$

где j – индекс составной части;

H – подмножество недиагностируемых составных частей;

D – подмножество диагностируемых составных частей.

Вероятности отказов наименее надежных составных частей – передних тормозных колодок – иллюстрируются рис. 4. При пробеге 20 тыс. км контроль состояния передних тормозных колодок прошли 107 автомобилей. Из них только 99 автомобилей проходили очередное техническое обслуживание при пробеге 30 тыс. км. Информация об остальных 8 автомобилях утрачена. На пробеге от 20 до 30 тыс. км произошел один отказ передних тормозных колодок, а на пробеге от 30 до 40 тыс. км – три отказа. Поскольку периодичность контроля передних тормозных колодок – 20 тыс. км

(см. табл. 1), в течение установленного межконтрольного периода произошло 4 их отказа, приходящихся на 99 автомобилей, наблюдение за которыми продолжалось до пробега 40 тыс. км. Поэтому вероятность отказа передних тормозных колодок на пробеге от 20 до 40 тыс. км определена как частное от деления 4 на 99, что составило 0,0404. Аналогично определены вероятности отказа передних тормозных колодок на последующем пробеге, а также вероятности отказа других элементов и систем автомобилей.

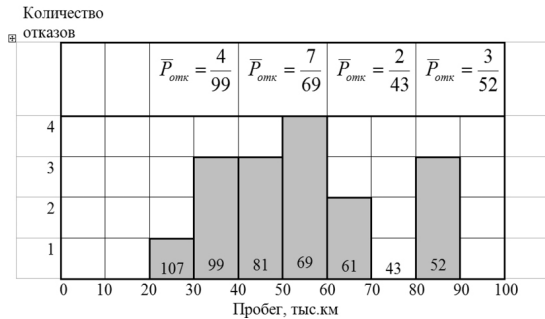


Рис. 4. К определению вероятности отказов передних тормозных колодок в межконтрольные периоды при установленном графике планового обслуживания

Предварительный анализ результатов показал, что из-за большого межконтрольного периода диагностирования вероятность отказа автомобиля хотя и меньше, чем при отсутствии диагностирования, но все же весьма велика. Поэтому был проработан вариант, предусматривающий уменьшение периодичности контроля. Фрагмент рекомендуемого графика планового технического обслуживания представлен в табл. 2.

При определении вероятностей отказа составных частей автомобиля в межконтрольный период при рекомендуемом графике планового обслуживания учитывались не все отказы, имевшие место в течение установленного межконтрольного периода, а только отказы, имевшие место в течение предлагаемого уменьшенного межконтрольного периода. Это иллюстрируется рис. 5.

Таблица 2.

Фрагмент рекомендуемого графика планового технического обслуживания

Контролируемые системы и элементы	Пробег, тыс. км								
	1	10	20	30	40	50	60	70	80
Тормозная система			1	1	1	1	1	1	1
Несущая система					1		1		1
Сцепление		1	1	1	1	1	1	1	1
Коробка передач	1				1				1
Двигатель	1		1		1		1		1
Электрооборудование		1	1	1	1	1	1	1	1

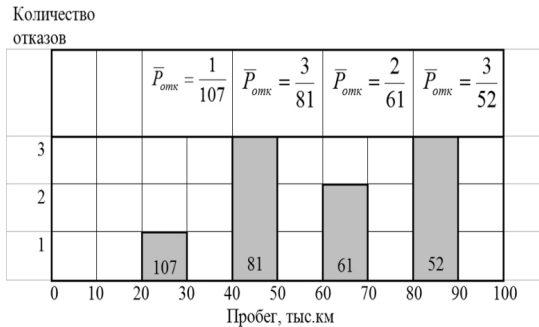


Рис. 5. К определению вероятности отказов передних тормозных колодок в межконтрольные периоды при рекомендуемом графике планового обслуживания

На пробеге от 20 до 30 тыс. км произошел один отказ передних тормозных колодок, а на пробеге от 30 до 40 тыс. км – три отказа. Поскольку периодичность контроля передних тормозных колодок уменьшена с 20 до 10 тыс. км (см. табл. 2), в течение установленного межконтрольного периода зафиксировано не 4 их отказа, а всего один, приходящийся на 107 автомобилей, наблюдение за которыми продолжалось до пробега 30 тыс. км. Поэтому вероятность отказа передних тормозных колодок на пробеге от 20 до 30 тыс. км определена как частное от деления 1 на 107, что составило 0,0093. Аналогично определены вероятности отказа передних тормозных колодок на последующем пробеге, а также вероятности отказа других элементов тормозной системы.

Анализ и развитие полученных результатов

В течение межконтрольного периода вероятность отказа не остается постоянной. В начале периода после проведенного ТО или ремонта она близка к нулю, затем увеличивается с нарастающей скоростью и достигает максимума к моменту очередного контроля. Подобная модель зависимости ресурса от периодичности ТО и предельного износа, показанная на рис. 6, была предложена А.М.Шейниным [12].

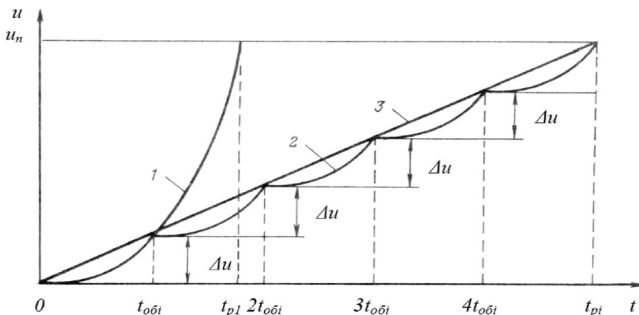


Рис. 6. Зависимость ресурса от периодичности ТО и предельного износа: 1 – случай, когда техническое обслуживание не производится; 2 – процесс изнашивания в межконтрольный период; 3 – аппроксимация кривых 2

Результаты наших исследований показывают, что в целом вероятности отказов в межконтрольные периоды имеют тенденцию роста с увеличением пробега. Однако эта тенденция не везде наглядно проявляется, а в ряде случаев отсутствует. Это вызвало необходимость корреляционно-регрессионного анализа зависимостей вероятности отказов в межконтрольные периоды от пробега. Корреляционный анализ должен дать ответ на вопрос о наличии взаимосвязи вероятности отказов и пробега, а при ее наличии – о силе взаимосвязи. В случае тесной взаимосвязи изучаемых параметров с помощью регрессионного анализа должны быть определены в аналитическом виде зависимости, позволяющие рассчитать вероятности отказов в межконтрольные периоды на любом интервале пробега автомобиля в рассматриваемом его

диапазоне. При отсутствии изучаемых зависимостей для некоторых составных частей автомобиля вероятности их отказов в межконтрольные периоды могут быть взяты как средние значения в рассматриваемом диапазоне пробега [15].

При корреляционно-регрессионном анализе проверялась гипотеза о линейной зависимости вероятности отказа $P_{отк}$ от пробега x , при котором производится диагностирование:

$$P_{отк} = a + b,$$

где a и b – постоянные параметры уравнения регрессии.

Параметры уравнений регрессии для существующей и рекомендуемой периодичности диагностирования приведены в табл. 3. Характер зависимостей вероятностей отказов составных частей автомобилей в межконтрольные периоды от пробега различен для разных составных частей, а также для существующей и рекомендуемой периодичности диагностирования. В качестве примера на рис. 7 и 8 приведены вероятности отказов передних тормозных колодок в межконтрольные периоды при действующем и рекомендуемом графиках планового обслуживания.

Таблица 3.

Параметры уравнений регрессии

Контролируемые элементы	Вариант периодичности диагностирования							
	существующий				рекомендуемый			
	a	b	Коэффициент корреляции	$\overline{P_{отк}}$	a	b	Коэффициент корреляции	$\overline{P_{отк}}$
Колодки тормозные передние	0,06225	-0,000015	-0,014	0,0615	-0,00105	0,000705	0,917	-
Колодки тормозные задние	0,03045	0,000586	0,589	0,0598	-0,00720	0,000685	0,826	-
Диск тормозной передний	-0,00235	0,000332	0,844	-	-0,00960	0,000288	0,775	-
Диск тормозной задний	-0,00235	0,000565	0,479	0,0263	-0,00960	0,000288	0,775	-

Суппорт задний	-0,00960	0,000370	0,924	-	-0,00960	0,000370	0,924	-
Амортизатор передний	-	-	-	0,0233	-	-	-	0
Пружина передняя	-	-	-	0,0698	-	-	-	0,0145
Тяга задняя продольная	-	-	-	0,0233	-	-	-	0
Сайлент-блок переднего рычага	-	-	-	0,0233	-	-	-	0
Подшипник ступицы переднего колеса	-	-	-	0,1395	-	-	-	0,0247
Сцепление	-0,00859	0,000338	0,598	0,0066	-0,00859	0,000338	0,598	0,0066
Стартер	-0,00130	0,000358	0,486	0,0148	-0,00130	0,000358	0,486	0,0148
Прокладка клапанной крышки	0,00725	-0,000072	-0,258	0,0036	0,00725	-0,000072	-0,258	0,0036
Гидрокомпенсатор	0,00725	-0,000072	-0,258	0,0036	0,00725	-0,000072	-0,258	0,0036

При действующем графике планового обслуживания (рис. 7) вероятности отказов практически не зависят от пробега, при котором осуществлялось диагностирование. Это объясняется тем, что периодичность диагностирования соизмерима с наработкой колодок на отказ и между отказами, и в этой ситуации эффект от проведения диагностирования незаметен: отказы возникают равновероятно и при меньших, и при больших пробегах.

Уменьшение периодичности диагностирования дает существенный эффект: вероятности отказов в межконтрольные периоды значительно снижаются. При малых пробегах они на порядок ниже, а при больших пробегах приближаются к вероятностям отказов, имеющим место при большой периодичности диагностирования (рис. 8).

Зависимость изучаемых параметров принято считать статистически значимой, если коэффициент корреляции при линейной форме связи больше 0,67 [4]. При действующем графике планового обслуживания коэффициент корреляции вероятности отка-

зов передних тормозных колодок и пробега равен $-0,014$ (табл. 1.5), что свидетельствует о практическом отсутствии взаимосвязи. Поэтому для передних тормозных колодок взято среднее значение вероятности отказов, равное $0,0615$ (см. рис. 7).

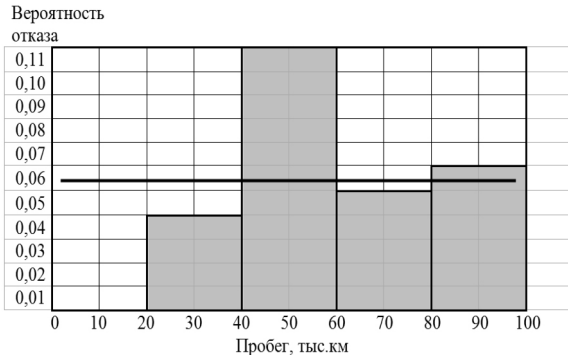


Рис. 7. Вероятности отказов передних тормозных колодок в межконтрольные периоды при действующем графике планового обслуживания

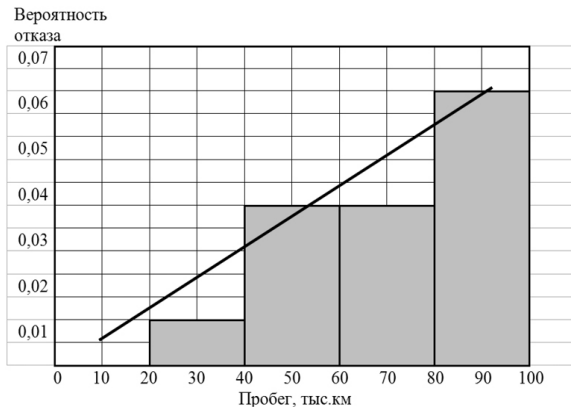


Рис. 8. Вероятности отказов передних тормозных колодок в межконтрольные периоды при рекомендуемом графике планового обслуживания

При рекомендуемом графике планового обслуживания для всех элементов тормозной системы коэффициент корреляции изучаемых параметров больше $0,67$, что говорит о наличии статистически значимой взаимосвязи. Полученные для них уравнения

регрессии позволяют определить вероятности отказа в межконтрольных периодах, предусмотренных рекомендуемым графиком планового обслуживания.

Методика распределения машин по объектам и видам работ

Количество машин в работоспособном состоянии должно быть достаточным для обязательного выполнения заданного объема работ. Однако разработанные методы планирования и управления парками машин недостаточно учитывают необходимость отвлечения машин от рабочего процесса в связи с необходимостью их ТО и ремонта. Выход машин в ТО и ремонт может быть неравномерным, и тогда в периоды его повышенной интенсивности возникает опасность невыполнения заданного объема работ.

Задача распределения машин по объектам работ решается в условиях ограничений на различные ресурсы, необходимые для выполнения работ. Этим занимается теория расписаний [8,9]. Парк машин можно рассматривать как отдельный ресурс, специфика которого состоит в наличии вероятности отказа (выхода из строя по техническим причинам).

Постановка подобной задачи звучит следующим образом. Дано множество проектных заданий Z ($z = 1, \dots, Z$), каждое из которых включает определенный набор из N возможных работ ($j = 1, \dots, N$), т.е. $j \in Z$. К примеру, задание «строительство дома» может состоять из работ «выемка грунта», «укладка фундамента», «возведение стен первого этажа» и т.д. Заданы K ($k = 1, \dots, K$) наименований машин, необходимых для выполнения работ, и R ($r = 1, \dots, R$) ресурсов. В каждый момент времени t_s доступны M_k ($i = 1, \dots, k$) машин k -го типа и Q_r единиц r -го ресурса. Заданы продолжительности выполнения $T_j \geq 0$ каждой работы j и продолжительность T всего периода планирования (выполнения всех заданий). Для выполнения j -й работы требуется $m_{jk} \leq M_k$ k -х машин и $q_{jr} \leq Q_r$ единиц r -го ресурса. После завершения j -й работы освобожденные машины и ресурсы в полном

объеме могут быть назначены на выполнение других работ. При постановке задачи могут рассматриваться так называемые возобновляемые ресурсы (рабочие различных профессий, инструмент) и не возобновляемые ресурсы, например, деньги, материалы, топливо и т.п.

Между некоторыми парами работ заданы ограничения предшествования: $j^* \rightarrow j$ означает, что выполнение j^* -й работы начинается не раньше окончания j -й работы.

Разобьем интервал времени T_k между двумя смежными ТО или плановыми ремонтами k -х машин на равные периоды времени $t_1, \dots, t_s, \dots, T_k$ (рис. 9). Длительность периодов зависит от требуемой точности расчетов.

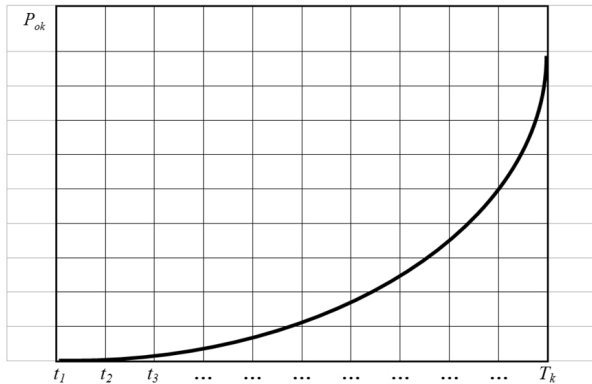


Рис. 9. Зависимость вероятности отказа машины от времени ее работы

Рассчитаем вероятности отказа машин k -го типа при выполнении j -й работы для каждого s -го периода $P_{ок}(t_s)$. Будем считать вероятностью срыва задания $P_{оз}$ отказ хотя бы одной машины. Здесь возможны две постановки задачи. Первая – минимизировать вероятность срыва задания при ограниченном времени его выполнения. Вторая – минимизировать время выполнения задания при ограниченной вероятности его срыва. Жесткость ограничений определяется ответственностью задания. Рассмотрим задачу в первой постановке.

Введем целочисленную переменную $x_{ij}(t_s)$, принимающую значение 1, если в s -м периоде i -я машина k -го типа назначается для выполнения j -й работы, и значение 0 в противном случае. Требуется так распределить машины по работам и периодам, чтобы минимизировать вероятность срыва задания:

$$P_{oz} = \sum_{j \in Z} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^k \sum_{s=1}^S \max_s P_{oij}(t_s) \cdot x_{ij}(t_s) \tag{4}$$

при ограничениях:

$$T_z \leq T_z^{\max} \quad (z = 1, \dots, Z) \tag{5}$$

(суммарное время выполнения z -го задания не превосходит максимально допустимого времени);

$$\sum_{i=1}^k x_{ij}(t_s) \geq m_{jk} \cdot \varphi_s \quad (s = 1, \dots, S; j = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K) \tag{6}$$

(число всех k -х машин достаточно для выполнения всех j -х работ во всех s -х периодах, где $\varphi_s = 1$, если j -я работа в s -м периоде выполняется, и $\varphi_s = 0$ в противном случае);

$$\sum_{j=1}^N q_{jr}(t_s) \cdot \varphi_s \leq Q_r \quad (j = 1, \dots, N; r = 1, \dots, R) \tag{7}$$

(расход всех r -х ресурсов на выполнение всех j -х работ не превосходит их наличия);

$$x_{ij}(t_s) = x_{ij}^2(t_s) \quad (s = 1, \dots, S; i = 1, \dots, k; j = 1, \dots, N) \tag{8}$$

(целочисленные переменные могут принимать только два возможных значения: 0 или 1).

Должны быть обязательно заданы ограничения по соблюдению отношений предшествования между работами, но характеристики взаимосвязей между работами могут различаться. Естественной представляется взаимосвязь типа «Окончание – Начало», т.е. работа-последователь начнется только тогда, когда закончится работа-предшественник. Но могут быть связи и другого типа, например, связи «Начало – Начало» (когда работа-последователь не может начаться раньше, чем начнется работа-предшественник), «Окончание-Окончание», «Начало-Окончание». Более того, по технологии между окончанием работы-предшественника и нача-

лом работы-последователя может быть задана задержка по времени. Также могут быть заданы ограничения на время выполнения работ. В этих случаях параметр принимает значения: «Как можно раньше», «Как можно позже», «Фиксированная дата», «Начало не позже», «Начало не раньше» и пр.

Задача (4) – (8) является задачей дискретного (целочисленного) программирования с булевыми переменными. Решение задачи представляет собой рекомендуемый набор целочисленных переменных $x_{ij}(t_s)$, определяющих для каждого s -го периода место каждой i -й машины из числа машин k -го типа в комплексе всех выполняемых j -х работ. Допустимым является решение, удовлетворяющее ресурсным ограничениям, в том числе учитывающим выход машин в ТО и ремонт, и ограничениям предшествования.

Если учесть все поставленные выше условия и наложить ограничения в полном объеме, то решить задачу даже относительно небольшой размерности по единому алгоритму невозможно. В подобных ситуациях приходится идти по пути морфологического расчленения [14], т.е. делить общую задачу на ряд частных взаимосвязанных задач меньшей размерности.

Но даже без дополнительных ограничений, учитывающих все обстоятельства поставленной задачи, задача остается экстремально трудной [16]. Лучший из известных точных алгоритмов решения подобных, но менее сложных задач, алгоритм Брукера [13] за приемлемое время может решать примеры размерности не больше $n = 60$. Более того, даже для частного случая с одним не возобновляемым ресурсом неизвестны алгоритмы решения с приемлемой погрешностью [9].

Это вызывает необходимость применения эвристических методов решения поставленной задачи. Разработанный алгоритм основан на методе «ветвей и границ» и позволяет изменять исходные условия, учитывая приоритетность заданий, выполняемых парком машин.

Выводы

1. При распределении машин по объектам и видам работ, различающимся степенью важности, ответственности за полноту и сроки выполнения задания, необходимо учитывать техническое состояние техники.

2. Используемый в теории старения машин показатель потенциала работоспособности машины позволяет оценивать техническое состояние «средней машины», представляющей большое число машин рассматриваемого класса, и не предусматривает возможности моделирования изменения отдельных характеристик конкретной машины.

3. Для решения задачи моделирования изменения отдельных характеристик конкретной машины предлагается использовать вероятность отказа. Представлены методы расчета этого показателя для составных частей машины, подвергающихся диагностированию, и не имеющих такой возможности, а также для машины в целом.

4. На основе полученных экспериментальных данных получены зависимости вероятности отказа автомобиля от величины межконтрольного периода, установлены закономерности изменения вероятности отказа в течение межконтрольного периода и с увеличением пробега автомобиля. Полученные уравнения регрессии позволяют определить вероятности отказа в межконтрольных периодах и при любых пробегах автомобиля.

5. Предложены математическая модель и методика распределения машин по объектам и видам работ с учетом степени важности, ответственности за полноту и сроки выполнения задания, а также технического состояния машин и ограничений на различные ресурсы, необходимые для выполнения работ.

Список литературы

1. Дехтеринский Л.В. Моделирование процессов восстановления машин / В.П.Апсин, Л.В.Дехтеринский, С.Б.Норкин, В.М.Приходько. М.: Транспорт, 1996. 311 с.

2. Дехтеринский Л.В. Потенциал работоспособности большой системы / Л.В. Дехтеринский, С.Б. Норкин, А.П. Павлов // Проблемы создания информационных технологий: сб. науч. тр., вып. 5. М.: Международная академия информационных технологий, 2000. С. 87-101.
3. Дехтеринский Л.В. Формирование параметров имитационной модели старения и восстановления системы / Л.В. Дехтеринский, С.В. Киреева, С.Б. Норкин // Проблемы обеспечения надежности машин при ремонте: сб. науч. тр. М.: МАДИ (ГТУ), 2001. С. 27-34.
4. Карагодин В.И. Математическое моделирование процессов и систем технического сервиса на транспорте. Прикладные задачи: учебник (Бакалавриат и магистратура). М.: КНОРУС, 2024. 374 с.
5. Карагодин В.И. Эффективность системы автосервиса / В.И.Карагодин, Д.Р.Бокарев. М.: ООО «Техполиграфцентр», 2009. 164 с.
6. Kia Rio / Kia K2 с 2017 г. Руководство по ремонту и эксплуатации. Москва: Монолит, 2022. 406 с.
7. Kia Sportage. Модели 2010-2016 гг. выпуска с бензиновым G4KD (2,0 л) и дизельным D4HA (2,0 л CRDI) двигателями. Серия «Профессионал». Каталог расходных запасных частей. Характерные неисправности. Руководство по ремонту и техническому обслуживанию. М.: Легион-Автодата, 2018. 606 с.
8. Конвей Р. В. Теория расписаний / Р. В. Конвей, В. Л. Максвелл, Л. В. Миллер. Москва: изд-во «Наука», 1975. 360 с.
9. Лазарев А.А. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы / А.А. Лазарев, Е.Ф. Гафаров. М.: МГУ им. М.В.Ломоносова, 2011. 222 с.
10. Павлов А.П. Теория потенциала работоспособности и ремонтного резервирования надежности стареющих технических систем: учебное пособие / А.П. Павлов, Л.В. Дехтеринский, С.Б. Норкин, С.А. Скрипников. МАДИ. М., 2013. 104 с.
11. Селиванов А.И. Основы теории старения машин. М.: Машиностроение, 1970. 408 с.
12. Шейнин А.М. Эксплуатационная надежность автомобилей. М.: Высшая школа, 1973. 110 с.

13. Brucker P., Knust S. Complex scheduling. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 2006.
14. Footlib R.B., Collier L.M. Use of The Computer Facilities planning. Institute of Industrial Engineers. 1983. Vol. 15, №3. P. 50-58.
15. Karagodin V.I., Khapugin R.A. Rationale and frequency of the diagnosis of component parts of tractors Belarus in the development of technology maintenance // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019. BRISTOL, 2020. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012005>
16. Zhiyu Yang, Jixin Wang, Guangzong Gao, Xiangyun Shi; Evolutionary Algorithms and Metaheuristics: Applications in Engineering Design and Optimization // Mathematical Problems in Engineering. 2017. Vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7076583>

References

1. Dekhterinsky L.V. *Modeling of machine restoration processes* / V.P.Apsin, L.V.Dekhterinsky, S.B.Norkin, V.M.Prikhodko. Moscow: Transport, 1996, 311 p.
2. Dekhterinsky L.V. The performance potential of a large system / L.V. Dekhterinsky, S.B. Norkin, A.P. Pavlov. *Problems of information technologies creation: collection of scientific articles*, vol. 5. Moscow: International Academy of Information Technologies, 2000, pp. 87-101.
3. Dekhterinsky L.V. Formation of parameters of the simulation model of system aging and restoration / L.V. Dekhterinsky, S.V. Kireeva, S.B. Norkin. *Problems of machine reliability assurance during repair: collection of scientific articles*. Moscow: MADI (GTU), 2001, pp. 27-34.
4. Karagodin V.I. *Mathematical modeling of processes and systems of technical service on transport. Applied tasks: textbook*. M.: KNORUS, 2024, 374 p.
5. Karagodin V.I. *Efficiency of the automobile service system* / V.I.Karagodin, D.R.Bokarev. Moscow: Tekhpolygon LLC, 2009, 164 p.

6. *Kia Rio / Kia K2 from 2017. Repair and operation manual*. Moscow: Monolit, 2022, 406 p.
7. Kia Sportage. Models 2010-2016 years of production with gasoline G4KD (2.0 liter) and diesel D4HA (2.0 liter CRDI) engines. Professional Series. Consumable spare parts catalog. Characteristic malfunctions. Repair and maintenance manual. Moscow: Legion-Avtodata, 2018. 606 c.
8. Conway, R. V. *Theory of schedules* / R. V. Conway, W. L. Maxwell, L. V. Miller. Moscow: Nauka, 1975, 360 p.
9. Lazarev A.A. *Theory of schedules. Problems and algorithms* / A.A. Lazarev, E.F. Gafarov. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2011, 222 p.
10. Pavlov A.P. *Theory of serviceability potential and repair redundancy of the aging technical systems reliability: textbook* / A.P. Pavlov, L.V. Dekhterinsky, S.B. Norkin, S.A. Skripnikov. M.: MADI, 2013, 104 p.
11. Selivanov A.I. *Fundamentals of the theory of machine aging*. Moscow: Mashinostroenie, 1970, 408 p.
12. Sheinin A.M. *Operational reliability of automobiles*. Moscow: Higher School, 1973, 110 p.
13. Brucker P., Knust S. *Complex scheduling*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Germany, 2006.
14. Footlib R.B., Coller L.M. *Use of The Computer Facilities planning*. Institute of Industrial Engineers. 1983. Vol. 15, №3. P. 50-58.
15. Karagodin V.I., Khapugin R.A. Rationale and frequency of the diagnosis of component parts of tractors Belarus in the development of technology maintenance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019*. BRISTOL, 2020. P. 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/832/1/012005>
16. Zhiyu Yang, Jixin Wang, Guangzong Gao, Xiangyun Shi. Evolutionary Algorithms and Metaheuristics: Applications in Engineering Design and Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, vol. 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7076583>

ДАнные ОБ АВТОРЕ

Карагодин Виктор Иванович, профессор кафедры «Дорожно-строительные машины», доктор технических наук
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)
Ленинградский проспект, 64, г. Москва, 125319, Российская Федерация
bik250248@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHOR

Viktor I. Karagodin, Professor of the Department of Road Construction Machinery, Doctor of Technical Sciences
Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)
64, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125319, Russian Federation
bik250248@yandex.ru
SPIN-code: 3261-0521
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8220-9928>

Поступила 20.09.2024

После рецензирования 14.10.2024

Принята 22.10.2024

Received 20.09.2024

Revised 14.10.2024

Accepted 22.10.2024