

Метод планирования профилактик технического обслуживания роботизированных транспортных средств на основе анализа выполняемой функции.

Осмаков Н.А., Астапов В.Н

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

e-mail: nikitaosmakov2001@gmail.com, asta-2009@mail.ru

Аннотация

Надежность транспортных средств играет значительную роль в жизни человека, поэтому при их проектировании большое внимание уделяется расчётам надёжности. Практически у всех эксплуатируемых объектов имеются возможность определить данные о их ресурсе работы, выраженные в количестве часов наработки на отказ, либо количестве циклов или километрах пробега. Такие данные выведены на основе тестирования большого количества экземпляров в лабораторных условиях.

На основе статистических данных производят планирование планово-профилактического обслуживания, однако такое обслуживание является некорректным в плане остаточного ресурса эксплуатации – некоторые экземпляры могут эксплуатироваться в агрессивной среде, другие в щадящей, а при одинаковом времени использования их степень износа будет разной. Такие расчёты будут носить усредненный характер, и при планировании профилактик на их основе могут возникнуть потери, так как обслуживание может произойти слишком рано, либо слишком поздно.

Более прогрессивным и точным способом планирования профилактик является предсказательное обслуживание, основанное на степени выполнения заданной функции элементом. Такое планирование позволит максимально эффективно использовать ресурс, при этом, не допуская его аварийного состояния.

Предлагаемый способ планирования профилактик основывается на определении отклонения выполнения заданной функции от эталонного значения в пределах определенного диапазона.

Ключевые слова:

Автоматизация, надёжность, наработка, профилактика, планирование профилактик, техническое обслуживание, методика планирования, тормозная система, регрессионная модель, транспортное средство.

Annotation

The reliability of vehicles plays a significant role in human life, therefore, when designing them, great attention is paid to reliability calculations. Almost all operated facilities have the ability to determine data on their operating life, expressed in the number of hours of operating time, or the number of cycles or kilometers of mileage. Such data are derived based on testing a large number of copies in the laboratory.

Based on statistical data, planning of scheduled preventive maintenance is carried out, however, such maintenance is incorrect in terms of the remaining service life - some instances may be operated in an aggressive environment, others in a gentle one, and with the same time of use, their degree of wear will be different. Such calculations will be of an average nature, and when planning preventive measures based on them, losses may occur, since maintenance may occur too early or too late.

A more progressive and accurate way of planning prevention is predictive maintenance based on the degree to which a given function is performed by an element. Such planning will make it possible to use the resource as efficiently as possible, while avoiding its emergency state.

The proposed method of planning preventive measures is based on determining the deviation of the performance of a given function from a reference value within a certain range.

Keywords:

Automation, reliability, operating time, prevention, prevention planning, maintenance, planning methodology, braking system, regression model, vehicle.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность транспортных средств играет значительную роль в жизни человека, поэтому при их проектировании большое внимание уделяется расчётам надёжности. Практически у всех эксплуатируемых объектов имеются возможность определить данные о их ресурсе работы, выраженные в количестве часов наработки на отказ, либо количестве циклов или километрах пробега. Такие данные выведены на основе тестирования большого количества экземпляров в лабораторных условиях.

На основе статистических данных производят планирование планово-профилактического обслуживания, однако такое обслуживание является некорректным в плане остаточного ресурса эксплуатации – некоторые экземпляры могут эксплуатироваться в агрессивной среде, другие в щадящей, а при одинаковом времени использования их степень износа будет разной. Такие расчёты будут носить усредненный характер, и при планировании профилактик на их основе могут возникнуть потери, так как обслуживание может произойти слишком рано, либо слишком поздно.

Более прогрессивным и точным способом планирования профилактик является предсказательное обслуживание, основанное на степени выполнения заданной функции элементом. Такое планирование позволит максимально эффективно использовать ресурс, при этом не допуская его аварийного состояния. Предлагаемый способ планирования профилактик основывается на определении отклонения выполнения заданной функции от эталонного значения в пределах определенного диапазона. В качестве примера рассмотрим метод планирования профилактик тормозной системы, как одной из ответственных систем автомобильного транспорта [1].

1 ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ

Используемая для расчётов в данной работе тормозная система является упрощенным аналогом реальной. Для рассмотрения выбраны следующие элементы: тормозные колодки, тормозная магистраль (соединяющие шланги с тормозной жидкостью), тормозной диск, педаль тормоза.

Каждый из этих элементов имеет паспортные характеристики от производителя, такие как срок службы, периодичность замены, поддерживаемые режимы работы, среда эксплуатации и другие. Условимся, что педаль тормоза, тормозной диск и тормозная магистраль имеют намного больший срок службы, чем тормозные колодки, поэтому расчёты будут производиться только на основе параметров износа тормозных колодок.

Производители тормозных колодок зачастую не публикуют в открытом доступе результаты испытаний собственной продукции, лишь обобщенные результаты.

В некоторых случаях имеется возможность найти информацию об испытаниях тормозных свойств колодок, однако, достоверность такой информации под вопросом.

Создадим собственный набор экспериментальных данных, для демонстрации предлагаемых методик. Масса транспортного средства составляет 30 т, количество осей 3, все колеса имеют возможность тормозить, транспортное средство прошло период обкатки, на тормозной системе установлен датчик для измерения тормозного усилия, температуры тормозов и отслеживания величины замедления. В соответствии с ГОСТ данное транспортное средство будет относиться к категории N3 [2,3].

Набор параметров, снятый при лабораторных испытаниях 100 экземпляров будет использован при расчёте ресурса тормозных колодок, выраженный в тыс. км. По статистике, срок службы тормозных колодок грузовых автомобилей не превышает 30-50 тыс. км [4].

Набор параметров, снятый при эксплуатации по автодрому будет использован для определения функции работы тормозной системы, на основе которой будет контролироваться состояние тормозной системы [5].

2 ОПИСАНИЕ РАСЧЁТА РЕСУРСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК

При проектировании плана профилактик технических средств, производят расчёт параметров на определенном промежутке времени, как вероятность безотказной работы, наработку до отказа, среднюю наработку до отказа. Среднюю наработку до отказа можно вычислить по следующей формуле [6]:

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i$$

Где N – количество работоспособных элементов при t=0, r_i - наработка до первого отказа каждого из объектов.

При проведении экспериментов снимается как коэффициент трения, так и замедление, после чего вычисляются коэффициент трения с использованием снятого замедления и замедление с использованием снятого коэффициента трения, для определения погрешности. Формулы для расчётов приведены ниже.

Для перевода давления из кг/см² в Н/см²:

$$P_H = \frac{P_{kg}}{0.10197162}$$

Где P_H – давление в Н/см², P_{kg} – давление в кг/см².

Перевод величины необходим, поскольку в последующих формулах необходимо использовать Н/см².

Для расчёта силы давления F :

$$F = P_H * S$$

Где F – сила торможения в Н, P_H – давление в Н/см², S – площадь поверхности торможения в см².

Площадь поверхности торможения равняется 90 см².

Для расчёта коэффициента трения по замедлению:

$$k = \frac{m * a}{F} = \frac{a * m}{S * P_{kg}} = \frac{a * 0.10197162 * m}{S * P_H}$$

Где a – замедление в м/с², F – сила торможения в Н, k – коэффициент трения, m – масса оси в кг, P_H – давление в Н/см², S – площадь поверхности торможения в см², P_{kg} – давление в кг/см².

Масса транспортного средства составляет 3 тонны, осей 3, соответственно на одну тормозную колодку приходится 5000 кг.

Для расчёта замедления по коэффициенту трения:

$$a = \frac{k * F}{m} = \frac{k * S * P_H}{m} = \frac{k * S * P_{kg}}{0.10197162 * m}$$

Где a – замедление в м/с², F – сила торможения в Н, k – коэффициент трения, m – масса оси в кг, P_H – давление в Н/см², S – площадь поверхности торможения в см², P_{kg} – давление в кг/см²

Для определения ресурса тормозных колодок по статистическим данным, необходимо рассчитать наработку на отказ в таком диапазоне, чтобы их эффективность соответствовала ГОСТ в плане замедления не менее 5 м/с². Воспользовавшись формулой расчёта наработки на отказ на определенном периоде, произведем расчёт до наступления неудовлетворительного выполнения функции торможения. Под отказом подразумевается прекращение элементом выполнения функции торможения или снижения эффективности торможения ниже заданного предела.

В таблице 1 приведены результаты испытаний 100 тормозных колодок на стенде с регулируемой инерционности оси и их рассчитанные характеристики. В качестве моделируемого транспортного средства выступает грузовое транспортное средство категории N3, с массой 30 тонн, с количеством осей 3. Параметры эксплуатационных характеристик: температура внешней среды 25 градусов, торможение производится со скорости 80 км/ч до 0 км/ч, температура тормозных колодок не должна превышать 300 градусов, тормозное усилие 80 кг/см², площадь тормозной поверхности после периода приработки 90 см², замедление должно быть не менее 5 м/с².

Таблица 1 – Данные испытаний и расчёта наработки на отказ элементов

Масса/ось	5000	площадь торможения, см ²	90				
Режим испытаний - торможение с 80 км/ч до 0км/ч при температуре окружающей среды 25 градусов цельсия, температурный режим работы колодок - от 0 до 300 градусов, 100 колодок, масса на ось -5000 кг							
№	Эквивалент пройденных тыс.км.	Работоспособные элементы	Коэффициент трения, средний	Замедление, м/с ²	средняя наработка на отказ за период (тыс.км.)	Отказавшие элементы	Сумма наработка на отказ
1	0	100	0,4	5,64863	0	0	0
2	2	98	0,45	6,354709	0,04	2	4
3	4	98	0,44	6,213494	0,12	2	12
4	6	98	0,42	5,931062	0,24	2	24
5	8	96	0,425	6,00167	0,56	4	56
6	10	80	0,43	6,072278	2,56	20	256
7	12	78	0,41	5,789846	5,2	22	520
8	14	75	0,4	5,64863	8,7	25	870
9	16	70	0,39	5,507415	13,5	30	1350
10	18	65	0,35	4,942552	19,8	35	1980
11	20	50	0,31	4,377689	29,8	50	2980
12	22	42	0,27	3,812826	42,56	58	4256

Ячейки в столбце «Сумма наработок на отказ» равны сумме предыдущей ячейки в данном столбце и произведению количества отказавших элементов на эквивалент пройденных тыс. км. Ячейки в столбце «Средняя наработка на отказ за период (тыс. км.)» вычисляются по формуле наработки, а именно произведением единицы, деленной на количество элементов на ячейку из столбца «Сумма наработок на отказ».

В столбце «Средняя наработка на отказ за период (тыс.км.)» можно видеть, что в среднем тормозные колодки работоспособны на периоде $((19,8+13,5)/2) = 16,65$ тыс. км., после этого значения характеристики торможения перестают быть удовлетворительными. Данная величина рассчитана исходя из формулы средней наработки. На основании этих данных планируют проведение профилактик транспортных средств, предполагая, за какое время транспортное средство проедет заданное расстояние, после чего разрабатывают календарный график ремонта тормозной системы (замены колодок).

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСА ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ПО ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДИКЕ

Предлагаемая методика планирования профилактик на основе выполняемой функции объекта является наиболее прогрессивной, позволяющей использовать ресурс компонента максимально эффективно. Применение такой методики позволит повысить доход компаний

за счёт снижения слишком ранних технических обслуживаний, и технических обслуживаний, производимых вследствие аварийных ситуаций, когда стоимость ремонта измеряется в размере нескольких обычных технических обслуживаниях. Эффективность данного метода проиллюстрируем с помощью сравнения графиков эксплуатации транспортного средства одной модели в разных условиях, приведенного на рисунке 1.

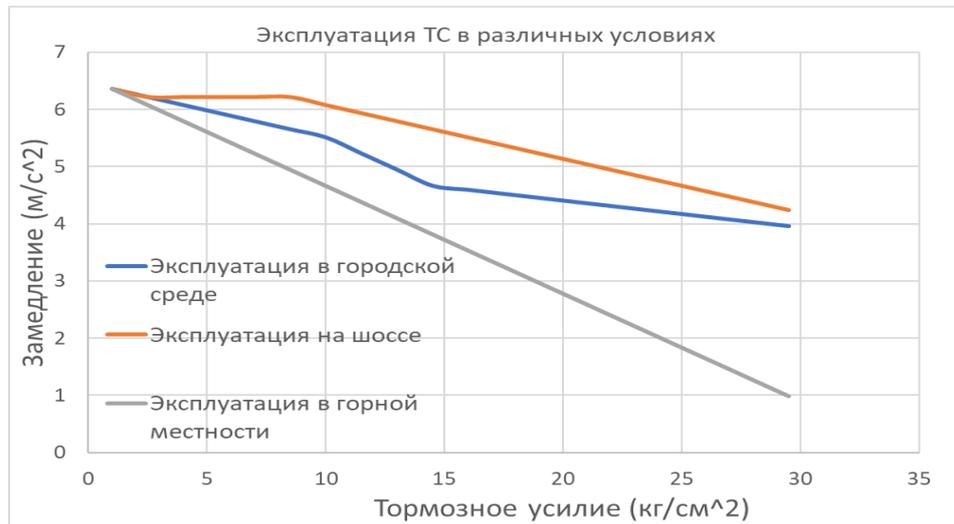


Рисунок 1 – График эксплуатации транспортного средства одной модели в различных условиях

Анализ графика показывает, что при эксплуатации транспорта в суровых условиях, тормозные колодки изнашиваются быстрее, чем в более благоприятных условиях. При этом, если планировать профилактики замены колодок только на основе статистических данных – каждые 16,65 тыс. км, то в случае с городской средой и горной местности эффективность тормозных колодок меньше, чем установлено ГОСТ, что приводит к небезопасной эксплуатации транспортного средства и может привести к авариям. Однако, при эксплуатации на шоссе, ресурс тормозных колодок еще не будет исчерпан, и их преждевременная замена принесет излишние затраты.

Некоторые элементы не целесообразно рассчитывать предлагаемым образом, например, педаль тормоза или тормозной диск – поскольку они имеют большой ресурс работы, и их диагностику можно проводить во время капитального/планового ТО, когда производится комплексное обслуживание.

Предлагаемый метод заключается в установке дополнительных датчиков в транспортное средство, которые будут снимать данные о его работе во время использования, после чего анализироваться специальным ПО, по специальным алгоритмам и определять степень выполнения заданной функции. При этом полученные показатели сравниваются с эталонными параметрами, которые были определены во время контрольного заезда.

В случае с тормозной системой, можно использовать специальный стенд для колодок, который позволит создавать нагрузку, соответствующую действительной, на тормозную колодку, после чего фиксировать данные о эффективности торможения с различных скоростей, при различном тормозном усилии и в разных температурных режимах, чтобы получить набор данных о поведении элемента, поскольку он представляет собой «черный ящик».

Аналогичным способом является фиксирование параметров с транспортного средства, которое прошло период обкатки и является гарантированно исправным, после чего определить временной интервал эксплуатации, при котором данные будут считаться эталонными.

Данные условия необходимы, поскольку технические средства в период приработки имеют большое количество отказов, связано это с выявлением заводского брака и скрытых дефектов в данный период. На рисунке 2 представлена функция интенсивности отказов для физического объекта, под цифрой 1- период приработки, 2- участок нормальной эксплуатации, 3 – участок старения элемента [7].

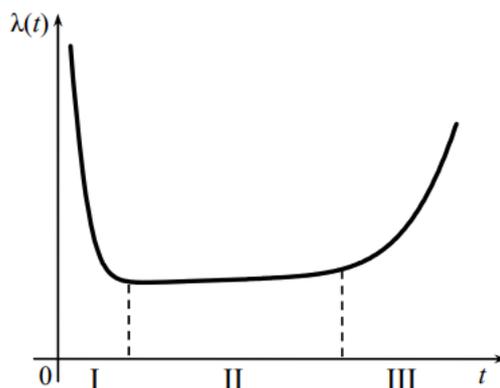


Рисунок 2 – График функции интенсивности отказов для физического объекта

После получения набора данных с эталонного объекта, их нужно обработать – провести регрессионный анализ данных, перед этим исключив недостоверные данные с помощью эксперта. После этого необходимо произвести достоверность полученных данных, для этого нужно определить отклонение результатов, полученной с помощью регрессионной модели, от результатов, снятых с объекта, но не участвовавших в процессе составления модели [8].

3.1 Определение ресурса тормозных колодок по предлагаемой методике

Для построения регрессионной модели, необходимо построить график зависимости замедления от тормозного усилия по снятым контрольным параметрам

В таблице 2 приведены результаты контрольного заезда по автодрому на исправном транспортном средстве после приработки. В качестве моделируемого транспортного средства

выступает грузовое транспортное средство категории N3, с массой 30 тонн, с количеством осей 3. Параметры эксплуатационных характеристик следующие: торможение производится до 0 км/ч, температура тормозных колодок не должна превышать 300 градусов, площадь тормозной поверхности после периода приработки 90 см², замедление должно быть не менее 5 м/с², при условии тормозного усилия от 70 до 85 кг/см².

Таблица 2 - Результаты контрольного заезда по автодрому на исправном транспортном средстве после приработки

Масса/ось	5000	площадь торможения, см ²	90			
Режим испытаний - снятие параметров торможения на исправном транспортном средстве после приработки на автодроме, масса на ось -5000 кг						
№	Скорость начала торможения, км/ч	Тормозное усилие, кг/см ²	Коэффициент трения	Температура тормозов	Замедление, м/с ²	
11	61	30	0,25	100	1,323898	
13	23	30	0,24	30	1,270942	
19	39	40	0,35	56	2,471276	
2	20	50	0,41	31	3,618654	
6	81	50	0,32	200	2,824315	
10	40	50	0,37	100	3,265614	
20	60	60	0,37	90	3,918737	
5	70	70	0,44	150	5,436807	
9	74	70	0,42	250	5,189679	
15	63	70	0,42	90	5,189679	
4	56	75	0,41	100	5,427981	
1	60	80	0,44	30	6,213494	
3	80	80	0,43	120	6,072278	
17	70	84	0,44	110	6,524168	
7	90	85	0,45	130	6,751879	
8	87	85	0,43	150	6,451795	
12	100	85	0,45	270	6,751879	
14	60	85	0,44	55	6,601837	
16	95	85	0,45	198	6,751879	
18	33	85	0,45	70	6,751879	

Из графика можно видеть, что зависимость линейная вида $y=kx+b$. Необходимо составить систему уравнений регрессии от двух параметров: тормозного усилия и температуры тормозных колодок.

Параметр тормозного усилия обозначен x_1 , параметр температуры тормозных колодок обозначен x_2 , y – замедление, n – количество точек (снятых результатов, в данном случае –

20), a, b_1, b_2 – коэффициенты в уравнении регрессии, которые необходимо найти. Тогда для двухфакторной модели система уравнений будет следующей:

$$\begin{cases} n * a + b_1 * \Sigma x_1 + b_2 * \Sigma x_2 = \Sigma y \\ a * \Sigma x_1 + b_1 * \Sigma x_1^2 + b_2 * \Sigma x_1 x_2 = \Sigma y x_1 \\ a * \Sigma x_2 + b_1 * \Sigma x_1 x_2 + b_2 * \Sigma x_2^2 = \Sigma y x_2 \end{cases}$$

После вычисления уравнения с помощью калькулятора, получаем коэффициенты:

$$a = -1.58203983033639$$

$$b_1 = 0.0975931140589139$$

$$b_2 = -0.000516586162552376$$

Подставляя коэффициенты в уравнение линейной регрессии, получится следующая функция, где x_1 – тормозное усилие, x_2 – температура тормозных колодок, Y_2 – замедление:

$$Y_2 = a + b_1 x_1 + b_2 x_2$$

На рисунке 3 представлен график зависимости замедления от тормозного усилия и график зависимости замедления от тормозного усилия и температуры колодок, построенный с помощью регрессии.

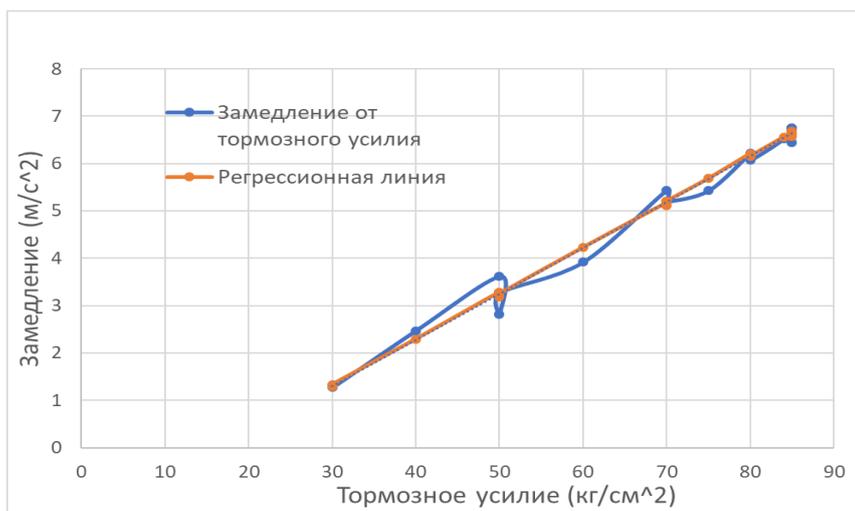


Рисунок 3 - График зависимости замедления от тормозного усилия и график зависимости замедления от тормозного усилия и температуры колодок, построенный с помощью регрессии.

После нахождения функции регрессии для данной модели транспортного средства с данным типом тормозных колодок, можно определить, как себя должна вести система при различных входных воздействиях. К примеру, определим, как себя должна вести тормозная колодка при тормозном усилии от 50 до 85 кг/см² при температурных режимах в 100, 200 и 300 градусов. Данные для построения представлены в таблице 8, где x_1 – тормозное усилие, x_2 – температура тормозных колодок, y_2 – рассчитанное замедление, a, b_1, b_2 – коэффициенты в

уравнении регрессии. Для каждой температуры рассчитаны значения, выделенные одним цветом.

На рисунке 4 представлен график зависимости замедления от температуры и тормозного усилия.

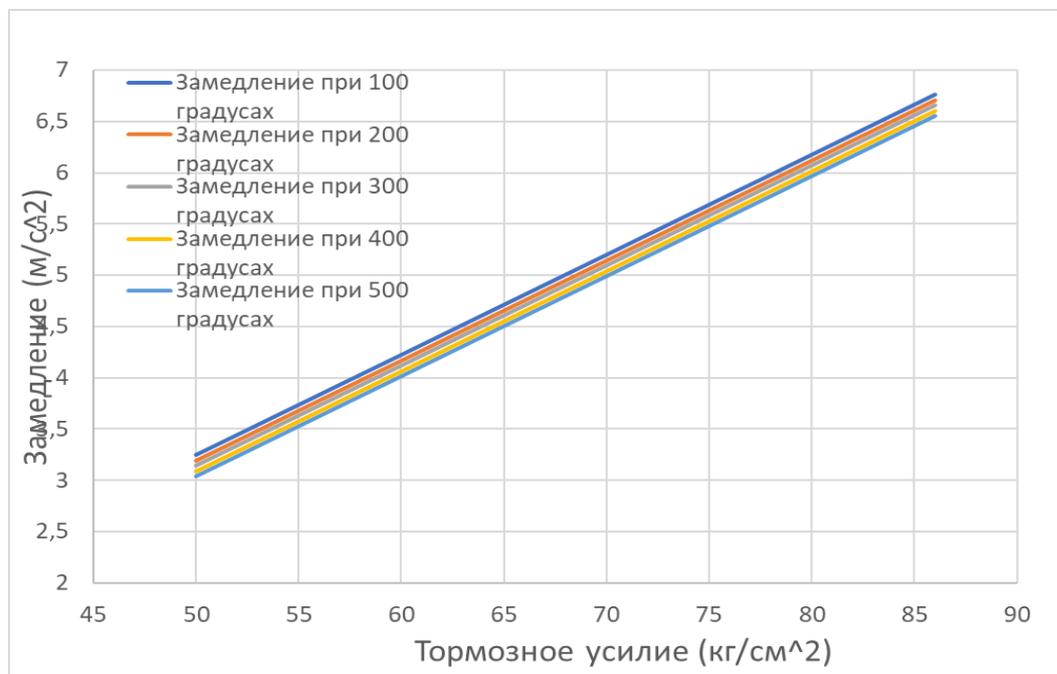


Рисунок 4 – график зависимости замедления от температуры и тормозного усилия

На основе данной функции теперь можно оценить эффективность работы тормозной системы в зависимости от любых входных данных тормозного усилия и температуры тормозных колодок. Данную функцию можно впоследствии интегрировать в специализированное ПО, которое будет отслеживать граничные значения и сообщать о предотказном состоянии элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были рассмотрены две стратегии планирования технического обслуживания – планово-профилактического, основанного на статистических данных, и предсказательное обслуживание, основывающееся на эффективности выполнения заданных функций. В качестве примера для демонстрации предлагаемого метода предсказательного планирования технического обслуживания была выбрана тормозная система транспортного средства с массой 30т, относящееся к категории N3 в соответствии с ГОСТ.

Были проанализированы статистические данные наработок тормозных колодок, установленных на данной модели, а также снятые экспериментальные данные с экземпляра, впоследствии принятые как эталонные. На основе снятых данных была создана регрессионная модель, позволяющая предсказывать поведение тормозной системы в

зависимости от входных воздействий, что является основой для оценивания состояния выполняемой функции в зависимости от подаваемых воздействий.

Такой подход к планированию профилактик позволит повысить безопасность эксплуатации транспортных средств, снизить риск возникновения серьезных поломок, а также сократить издержки на преждевременные ТО, по сравнению с классическим планированием профилактик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сай В. К. Архитектура системы предсказательного технического обслуживания сложных многообъектных систем в концепции Индустрии 4.0 // Программные продукты и системы 2020. №2 С. 186-194;
2. ГОСТ Р 52847-2007 Автомобильные транспортные средства. Тормозные механизмы. Технические требования и методы стендовых испытаний– Введ. 2009-01-01. – М.: Стандартинформ, 2008. 6 с.;
3. ГОСТ Р 52051-2003 Механические транспортные средства и прицепы – Введ. 2004-01-01. – М.: Стандартинформ, 2003. 12 с.;
4. Тормозные колодки КАМАЗ 5490 URL: <https://www.aspmaster.ru/news/kolodka-tormoznaya-kamaz-5490-kakie-perednie-kakie-zadnie#:~:text=%> . (Дата обращения 2024.10.08);
5. Хольшев Н. В., Конев А. Ю., Ведищев С. М. Прохоров А. В. Методика и результаты экспериментального определения коэффициентов трения некоторых автомобильных тормозных колодок // Вестник СибАДИ. 2023. Т. 20, № 1 (89). С. 114-124.;
6. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения – Введ. 2022-01-01. – М.: Стандартинформ, 2021. 36 с.;
7. А.Г. Щипицын Элементы прикладной теории надежности: учебное пособие / А.Г. Щипицын, А.А. Кошечев, Е.А. Алёшин и др. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. - 114 с.;
8. Построение множественной регрессии и оценка качества модели с использованием табличного процессора Excel. Учебное пособие по дисциплине «Эконометрика» / А.А. Чалганова. – [Текст : электронный]. – Санкт-Петербург : РГГМУ, 2022. – 90 с. – URL: http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_7e7cc56e08e54ee7aebc3086056bd05b.pdf (Дата обращения 2024.10.08).