

Мармут И.А.
 Харьковский национальный
 автомобильно-дорожный
 университет
 г. Харьков, Украина
 E-mail: mia2005.62@ukr.net

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

УДК 629.113.004

Выполнен анализ режимов и методов организации профилактических мероприятий, которые направлены на повышение надежности автомобилей. Основным критерием оптимизации обслуживания является интенсивность отказов. К основным видам профилактических воздействий относится диагностика. Рассмотрены три метода, позволяющие оптимизировать систему профилактических мероприятий при эксплуатации автомобиля на этапе с возрастающей интенсивностью отказов.

Ключевые слова: надежность автомобиля, отказ, оптимизация, диагностика.

Постановка проблемы в общем виде. Диагностика автомобиля является основой профилактических воздействий. Под профилактикой подразумевается комплекс планируемых мероприятий, направленных на предупреждение возникновения отказов, сохранение работоспособности и обеспечение долговечности. Она включает в себя, кроме диагностики, регулировочные работы и устранение выявленных при диагностике отказов [1].

Анализ исследований и публикаций. При решении задач, связанных с оценкой надежности автомобилей, необходимо установить выходные параметры, которые являются основной характеристикой объекта. Изменение этих параметров в процессе эксплуатации влияет на состояние объекта. На рис 1 приведена схема установления перечня выходных параметров автомобиля, при помощи которых можно оценить его работоспособность и уровень качества [2, 3].

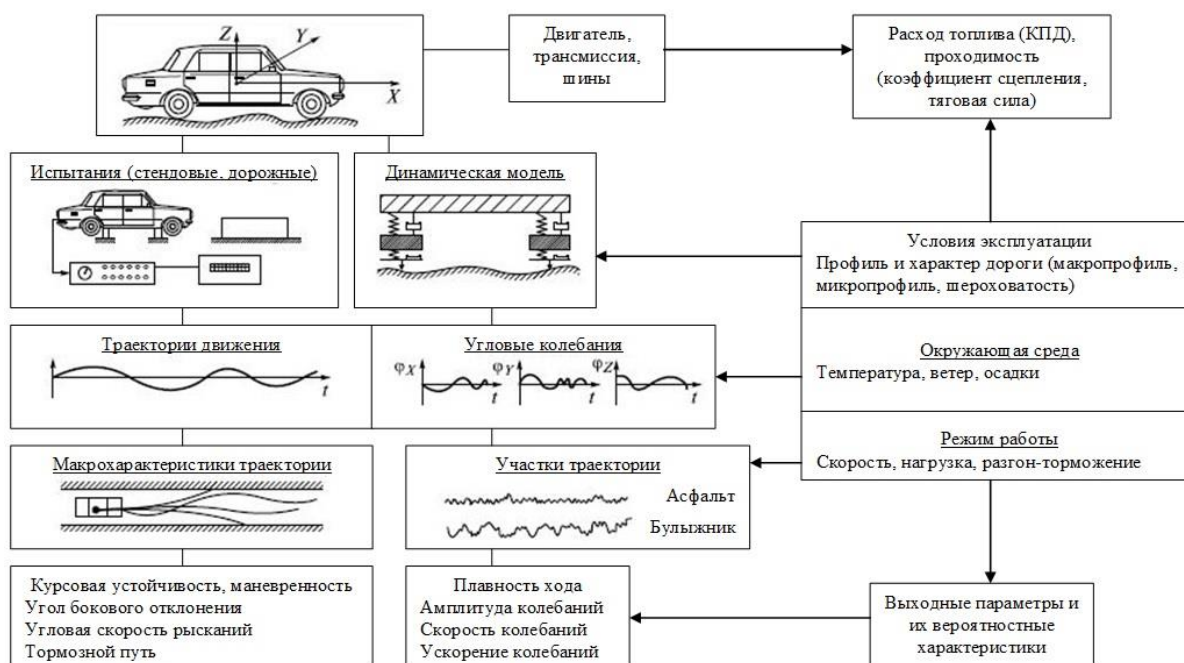


Рис. 1 – Схема выходных параметров автомобиля

Основным источником для получения выходных параметров являются характеристики движения автомобиля при различных режимах его работы и условиях эксплуатации (например, плавность хода, курсовая устойчивость, максимальная скорость, время

разгона и т.д.). Особое место занимают выходные параметры систем, обеспечивающих безопасность движения.

Универсальной характеристикой, отражающей поведение системы, является интенсивность отказов [4, 5]:

$$\lambda(t) = \frac{f(l)}{1 - F(l)}, \quad (1)$$

где $F(l) = P\{U < l\}$ – функция распределения вероятностей отказов; U – случайная величина, соответствующая пробегу при возникновении отказов; l – пробег, км; $f(l) = F'(l)$ – функция плотности вероятности распределения отказов.

На первом этапе работы автомобиля интенсивность отказов относительно невысокая и убывает по мере увеличения длительности его работы. Здесь наблюдаются отказы, обусловленные невыявленными технологическими дефектами. На втором этапе скорость нарастания износа неизменна, и интенсивность отказов остается постоянной. Третий этап эксплуатации характеризуется тем, что износ отдельных агрегатов возрастает, появляются износные отказы и интенсивность отказов увеличивается [6].

Постановка проблемы. Совершенно очевидно, что периодичность обслуживания должна назначаться в соответствии с тем, на каком этапе эксплуатации в данный момент находится автомобиль, т. е. периодичность зависит от изменения интенсивности отказов. Однако имеющиеся методы определения периодичности профилактических воздействий практически не учитывают интенсивности отказов и ее изменения в процессе эксплуатации. Действующие рекомендации по режимам профилактических обслуживаний предусматривают периодичность обслуживания, постоянную от начала эксплуатации автомобиля до определенного пробега (сервисная книжка) или до списания.

Ниже рассматриваются три метода, лишенные перечисленных недостатков и позволяющие оптимизировать систему профилактических мероприятий при эксплуатации автомобиля на третьем этапе с возрастающей интенсивностью.

Результаты исследования.

1. Профилактическое обслуживание выполняется после безотказной работы l_0 км пробега. Если отказ произошел до l_0 , обслуживание производится за время устранения отказа. Момент следующей профилактики при этом перепланируется. Этот метод наиболее эффективно предупреждает износные отказы и может быть рекомендован для агрегатов, обеспечивающих безопасность движения.

2. Профилактическое обслуживание осуществляется после общей наработки l_1 км пробега, независимо от ряда промежуточных отказов. При возникновении отказа выполняется минимально необходимый текущий ремонт.

3. Углубленное профилактическое обслуживание с введением операций текущего ремонта производится после k -го отказа. При предыдущих $(k - 1)$ отказах выполняется только минимально необходимый текущий ремонт.

Все эти методы предполагают, что после выполнения профилактики автомобили восстанавливают свое первоначальное техническое состояние. Это предположение необходимо для сохранения вида закона распределения отказов.

Будем считать периодичность, отыскиваемую по одному из указанных методов, оптимальной в том случае, когда она максимизирует коэффициент технической готовности автомобиля.

Метод 1. По определению он является оптимальным, когда максимизируется коэффициент технической готовности:

$$K_1(t) = \frac{M(U)}{M(U) + M(V)}, \quad (2)$$

где $M(U)$ – математическое ожидание наработки между профилактиками; $M(V)$ – математическое ожидание потерь пробега за время простоев.

Входящие в последнее уравнение выражения находятся по формулам

$$M(U) = \int_0^{l_0} [1 - F(l)] dl; \quad (3)$$

$$M(V) = S_p F(l_0) + S_n [1 - F(l_0)], \quad (4)$$

где S_p – математическое ожидание потерь пробега за время простоя в текущих ремонтах в течение пробега l_0 ; S_n – математическое ожидание потерь пробега за время T_n простоя при выполнении планового обслуживания.

Путем соответствующего подбора величины l_0 необходимо максимизировать выражение:

$$K_1(l) = \frac{\int_0^{l_0} [1 - F(l)] dl}{\int_0^{l_0} [1 - F(l)] dl + S_p F(l_0) + S_n [1 - F(l_0)]}. \quad (5)$$

Если взять производную по l_0 и приравнять ее нулю, получим выражение, из которого можно определить искомую величину l_0 (при $S_p > S_n$):

$$\lambda(l_0) = \int_0^{l_0} [1 - F(l)] dl - F(l_0) = \frac{S_n}{S_p - S_n}. \quad (6)$$

В правую часть последнего выражения можно подставлять и значения времени простоя T_n и T_p , так как S_n и S_p соответственно равны произведению времени простоя и эксплуатационной скорости.

Поскольку затраты в эксплуатации в общем случае пропорциональны времени простоя в ремонте и обслуживании, последнее уравнение справедливо и в том случае, если мы вместо S_n и S_p подставим стоимость профилактики C_n и стоимость текущего ремонта C_p :

$$\lambda(l_0) = \int_0^{l_0} [1 - F(l)] dl - F(l_0) = \frac{C_n}{C_p - C_n}. \quad (7)$$

Это уравнение позволяет определить l_0 , минимизирующее удельную стоимость. В случае применения закона распределения Вейбулла, т. е. когда $F(l) = 1 - e^{-\alpha l^\beta}$, последнее уравнение приобретает вид:

$$\alpha \beta l_0^{\beta-1} = \int_0^{l_0} e^{-\alpha l^\beta} dl + e^{-\alpha l_0^\beta} = \frac{C_n}{C_p - C_n}. \quad (8)$$

Метод 2. Как и для предыдущего метода, будем определять оптимальный период, максимизируя коэффициент технической готовности:

$$K_2(l) = \frac{M(U)}{M(U) + M(V)}. \quad (9)$$

Вероятность возникновения отказа в предложении, что после каждого отказа выполняется только минимально необходимый текущий ремонт за пробег $(l, l + \Delta t)$, равна $\lambda(l) dl$.

Пусть $N(l)$ обозначает число отказов на промежутке l . Мы вправе предположить,

что количество отказов $N(l)$, возникающих на промежутке $(0 \leq l < \infty)$, образует нестационарный пуассоновский процесс, тогда вероятность возникновения отказов равна

$$P_n(l) = \frac{Q(l)^n}{n!} e^{-Q(l)}, \quad (10)$$

где $Q(l) = \int_0^l \lambda(s) ds$.

Отсюда

$$M[N(l)] = \int_0^l \lambda(s) ds. \quad (11)$$

Подставляя в уравнение для $K_2(l)$ значение полученных величин, имеем:

$$K_2(l) = \frac{l_1}{l_1 + M[N(l)]S_p + S_n} = \frac{l_1}{l_1 + S_p \int_0^{l_1} \lambda(l) dl + S_n}. \quad (12)$$

Приравняв производную от этого выражения нулю, получим уравнение для определения l_1 :

$$l_1 \lambda(l_1) - \int_0^{l_1} \lambda(l) dl = \int_0^{l_1} l \lambda'(l) dl = \frac{S_n}{S_p}. \quad (13)$$

Если S_n и S_p выражают стоимость, то из последнего уравнения можно найти l_1 , соответствующее минимуму удельной стоимости. В случае применения закона Вейбулла, уравнение приобретает конкретное выражение, разрешимое относительно l_1 :

$$l_1 = \left(\frac{S_n}{\alpha(\beta-1)S_p} \right)^{\frac{1}{\beta}}. \quad (14)$$

Так, например, при $\alpha = \frac{1}{10^8}$, $\beta = 2$, $S_n/S_p = \frac{1}{2}$, $l_1 = \sqrt{\frac{10^8}{(2-1) \cdot 2}} = 7$ тыс.км.

Метод 3. Как и прежде, состоит в том, чтобы максимизировать коэффициент готовности:

$$K_3(k) = \frac{M(U)}{M(U) + M(V)} = \frac{U(k)}{U(k) + S_p(k-1) + S_n}. \quad (15)$$

Средняя суммарная наработка до k -го отказа $U(k) = \sum_{i=1}^k P_i M \times (U_i^k)$, где U_i^k – средняя суммарная наработка до k -го отказа i -го автомобиля, имеющего распределение отказов $F_i(x)$.

Как и ранее, предположим, что поток отказов представляет собой нестационарный пуассоновский процесс. Тогда вероятность того, что произошло ровно k отказов и что k -й отказ возник точно в момент l , равна

$$r_i(l) dl = \frac{[Q_i(l)]^{k-1}}{(k-1)!} e^{-Q_i(l)} \cdot \lambda_i(l) dl, \quad (16)$$

где $Q_i(l) = \int_0^l \lambda_i(x) dx$.

Тогда средняя суммарная наработка i -го автомобиля до k -го отказа может быть выражена через:

$$M(U_i^k) = \int_0^{\infty} l r_i(l) dl. \quad (17)$$

Таким образом, коэффициент технической готовности определяется с помощью выражения

$$K_3(k) = \frac{\sum_{i=1}^M P_i \int_0^{\infty} l r_i(l) dl}{\sum_{i=1}^M P_i \int_0^{\infty} l r_i(l) dl + (k-1)S_p + S_n}. \quad (18)$$

Обозначим знаменатель данного уравнения через $H(k)$ ($H(k) > 0$). Задача максимизирования $K_3(k)$ равносильна минимизированию функции

$$f(k) \equiv 1 - K_3(k) = \frac{(k-1)S_p + S_n}{H(k)}. \quad (19)$$

Минимум выражения $f(k)$ будет иметь место там, где приращение $\Delta f(k) = f(k+1) - f_k$ положительно.

Преобразовав неравенство $\Delta f(k) > 0$, получим окончательное уравнение для определения оптимального k_0 , при котором должно производиться углубленное профилактическое обслуживание:

$$\varphi(k) \equiv \left(1 - \frac{U(k)}{U(k+1)}\right) \left(k + \frac{S_n}{S_p}\right) > 1. \quad (20)$$

Чтобы получить конкретное выражение для k_0 , используем закон распределения Вейбулла, как наиболее соответствующий износовому характеру отказов механических систем:

$$F_i(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha_i x^\beta}, & x > 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (21)$$

Решая уравнение $\varphi(k)$ для этого случая, получим другое выражение:

$$k_0 = \left[\frac{1}{\beta-1} \frac{S_n - S_p}{S_p} \right] + 1, \text{ справедливое при } S_n > S_p. \quad (22)$$

В приведенные выше рассуждения введем критерий стоимости. Предположим, что средняя стоимость текущего ремонта равна S_p и средняя стоимость профилактики - S_n . Простои в ремонтах и обслуживании будем рассматривать как потери транспортной работы и оценивать их величиной C_o на единицу пробега.

Эффективность данного метода можно оценивать удельной стоимостью на единицу пробега. Обозначим ее через $C_3(k)$, получим:

$$C_3(k) = C_o \left[1 - K_3(k) + \frac{(k-1)C_p + C_n}{U(k) + (k-1)S_p + S_n} \right]. \quad (23)$$

Для минимизации $C_3(k)$ оптимальное значение k должно быть таким, чтобы $\Delta C_3(k) = C_3(k+1) - C_3(k) > 0$.

Отсюда после соответствующих преобразований получим условия для определения оптимального k_0 :

$$\frac{kU(k) - (k-1)U(k+1) + S_n}{U(k+1) - U(k) + S_n} < \frac{C_0 S_n + C_n}{C_0 S_p + C_p}. \quad (24)$$

В случае применимости закона Вейбулла это выражение преобразуется следующим образом:

$$\left[(S_p + C_p)(1-\beta) + \frac{S_n + C_n - (S_p + C_p)}{k} \right] > \frac{C_p \cdot S_n - C_n \cdot S_p}{k} \beta \left(k - \frac{1}{\beta} \right). \quad (25)$$

С помощью последнего выражения для различных значений C_p , C_n , S_p и S_n можно определять оптимальное k_0 .

Рассмотрим частные случаи:

а) если $C_p = C_n = 0$, тогда $k_0 = \left[\frac{1}{\beta-1} \left(\frac{S_n}{S_p} - 1 \right) \right] + 1$;

б) если $S_p = S_n = 0$, тогда $k_0 = \left[\frac{1}{\beta-1} \left(\frac{C_n}{C_p} - 1 \right) \right] + 1$;

в) если $\frac{S_n}{S_p} = \frac{C_n}{C_p}$, тогда $k_0 = \left[\frac{1}{\beta-1} \left(\frac{S_n + C_n}{S_p + C_p} - 1 \right) \right] + 1$.

Использование данного метода при организации системы профилактических мероприятий наиболее эффективно, так как позволяет полностью использовать весь технический ресурс до k_0 -го отказа, т.е. момента постановки на профилактику. В то же время, например, для второго метода неизбежен разброс наработок на отказ каждого отдельного автомобиля и отклонение от истинной потребности в профилактике.

В случае применимости закона Вейбулла оптимальная периодичность профилактики зависит только от параметра формы распределения β и не зависит от параметра размера α . Это очень удобно при практическом использовании данного метода, так как допускается варьирование параметром α в зависимости от частоты использования автомобиля и режимов его работы.

Для автомобилей, эксплуатируемых на этапе износных отказов, профилактика производится с обязательной предварительной диагностикой с периодичностью, устанавливаемой по формуле $l_1 \lambda(l_1) - \int_0^{l_1} \lambda(l) dl = \int_0^{l_1} l \lambda'(l) dl = S_n / S_p$, если эксплуатация строится по второму методу, и по формулам

$$\varphi(k) \equiv \left(1 - \frac{U(k)}{U(k+1)} \right) \left(k + \frac{S_n}{S_p} \right) > 1 \text{ и}$$

$$\left[(S_p + C_p)(1-\beta) + \frac{S_n + C_n - (S_p + C_p)}{k} \right] > \frac{C_p \cdot S_n - C_n \cdot S_p}{k} \beta \left(k - \frac{1}{\beta} \right),$$

если эксплуатация строится по третьему методу.

Выводы. Периодичность обслуживания автомобиля должна назначаться в соответствии с тем, на каком этапе эксплуатации в данный момент находится автомобиль, т.е. периодичность зависит от изменения интенсивности отказов.

Периодичность профилактического обслуживания для парка коммерческих автомобилей будет оптимальной, когда она максимизирует коэффициент технической готовности автомобиля.

При оптимизации системы профилактических мероприятий введены критерии стоимости – стоимость профилактики и стоимость текущего ремонта.

Выполненный теоретический анализ режимов и методов организации профилактических мероприятий свидетельствует о необходимости корректировки или изменения существующей технологии контроля, обслуживания и ремонта коммерческих автомобилей.

Литература:

1. Варфоломеев В.Н. Научные основы построения и реализации технологии поддержания автомобилей в работоспособном состоянии на базе диагностической информации: автореф. дис. на соискание степени докт. техн. наук: спец. 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» / В.Н. Варфоломеев. – К., 1994. – 32с.
2. Яхьяев Н.Я. Основы теории надежности и диагностика: учебник / Н. Я. Яхьяев, А. В. Кораблин. – М.: Академия, 2009. – 256 с.
3. Малкин В.С. Техническая эксплуатация автомобилей. Теоретические и практические аспекты: учебное пособие / В. С. Малкин. – М.: Академия, 2007. – 288 с.
4. Говорущенко Н.Я. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта) / Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. – Х.: ХГАДТУ, 1998. – 468 с.
5. Говорущенко Н.Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследований): монография / Н.Я. Говорущенко. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 292 с.
6. Говорущенко Н.Я. Техническая кибернетика транспорта: учебное пособие / Н.Я. Говорущенко, В.Н. Варфоломеев. – Х.: ХГАДТУ, 2001. – 271 с.

Summary

I. Marmut Optimization of the system of preventive activities when operating cars.

Under the prevention means the complex of planned measures aimed at preventing the occurrence of failures, preserving the health and ensuring longevity.

At the first stage of the car, the failure rate is relatively low and decreases with increasing duration of its work. Here there are failures due to technological defects. In the second stage, the rate of increase in wear is unchanged, and the failure rate remains constant. The third stage of operation is characterized by the fact that the wear of individual unit's increases, and the failure rate increases.

The current recommendations on preventive maintenance regimes provide for the frequency of maintenance, constant from the beginning of the vehicle operation to a certain mileage (service book) or until cancellation.

The article discusses three methods that allow you to optimize the system of preventive measures in the operation of the vehicle in the third stage with increasing intensity.

Method 1. Preventive maintenance is performed after trouble-free operation of a l_0 km mileage. If the failure occurred before l_0 , the service is performed during the time the fault was eliminated. The moment of the next prophylaxis is rescheduled. This method most effectively prevents failures from wear and tear and can be recommended for units that provide traffic safety.

Method 2. Preventive maintenance is carried out after a total operating time of l_1 km mileage, regardless of the number of intermediate failures. When a failure occurs, the minimum required maintenance is performed.

Method 3. In-depth preventive maintenance with the introduction of maintenance operations is performed after the k failure. In case of previous $(k - 1)$ failures, only the minimum required maintenance is performed.

The theoretical analysis of the modes and methods of organizing preventive measures indicates the need to adjust or change the existing technology for monitoring, maintaining and repairing automobiles.

Keywords: Car reliability, failure, optimization, diagnostics.

References

1. Varfolomeev V.N. Nauchnyie osnovyi postroeniya i realizatsii tehnologii podderzhaniya avtomobiley v rabotosposobnom sostoyanii na baze diagnosticheskoy informatsii: avtoref. dis. na soiskanie stepeni dokt. tehn. nauk: spets. 05.22.10 «Ekspluatatsiya avtomobilnogo transporta» / V.N. Varfolomeev. – K., 1994. – 32s.
2. Yahev N.Ya. Osnovyi teorii nadezhnosti i diagnostika: uchebnik / N. Ya. Yahyaev, A. V. Korablin. – M.: Akademiya, 2009. – 256 s.
3. Malkin V.S. Tehnicheskaya ekspluatatsiya avtomobiley. Teoreticheskie i prakticheskie aspekty: uchebnoe posobie / V. S. Malkin. – M.: Akademiya, 2007. – 288 s.
4. Govoruschenko N.Ya. Sistemotekhnika transporta (na primere avtomobilnogo transporta) / Govoruschenko N.Ya., Turenko A.N. – H.: HGADTU, 1998. – 468 s.
5. Govoruschenko N.Ya. Sistemotekhnika avtomobilnogo transporta (raschetnyie metodyi issledovaniy): monografiya / N.Ya. Govoruschenko. – H.: HNADU, 2011. – 292 s.
6. Govoruschenko N.Ya. Tehnicheskaya kibernetika transporta: uchebnoe posobie / N.Ya. Govoruschenko, V.N. Varfolomeev. – H.: HGADTU, 2001. – 271 s.