

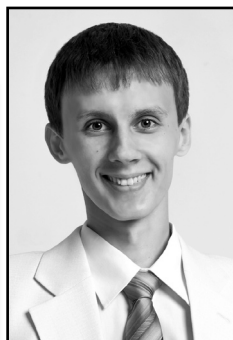


Расчёт протяженности гарантийного участка ПТО грузовых вагонов



Петр УСТИЧ
Petr A. USTICH

Александр ИВАНОВ
Alexander A. IVANOV



Дмитрий ЕМЕЛЬЯНОВ
Dmitry Yu. EMELIANOV

Устич Петр Андреевич – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

Иванов Александр Анатольевич – кандидат технических наук, доцент МИИТ, Москва, Россия.

Емельянов Дмитрий Юрьевич – аспирант МИИТ, Москва, Россия.

Calculation of the Warranty Section of a Maintenance Point of Freight Cars

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 39)

Рассмотрены вербальная модель работы осмотровиков и математическая модель расчётного обоснования гарантийного участка пункта технического обслуживания (ПТО) грузовых вагонов. При этом учтены показатели надёжности и безопасности вагона, допустимый уровень риска крушения, вероятность того, что осмотровик вагонов не обнаружит их неработоспособное состояние (допустит брак). На тестовом примере показано влияние эксплуатационных показателей на периодичность технического контроля.

Ключевые слова: железная дорога, гарантийный участок ПТО, периодичность контроля технического состояния вагона, вероятность брака при осмотре, вербальная модель, математическая модель, параметры безопасности вагона, расчетное обоснование.

Задача увеличения протяженности безостановочного пробега поездов намного серьезней, чем может показаться на первый взгляд.

Более полувека назад профессором МИИТ Л. А. Шадуром и его учениками было показано, что наращивание веса поездов за счёт увеличения погонных нагрузок вагонов является наиболее приемлемым с точки зрения замедления деградации самого фондоемкого элемента железных дорог – верхнего строения пути. Кроме того, при таком подходе не требуется удлинения станционных путей.

Под руководством Л. А. Шадура разработаны конструкции восьмиосных цистерн и полувагонов, ставших средством реализации повышенных погонных нагрузок. Так, в поезде из подобных восьмиосных полувагонов можно перевезти на 43% больше угля, руды и прочих грузов, чем в поезде равной длины, сформированном из четырёхосных полувагонов.

Аналогичный эффект достигался при использовании в перевозочном процессе восьмиосных цистерн, серийный выпуск которых продолжительное время был налажен на Ждановском вагоностроительном заводе (сегодня ПО «Азовмаш», г. Мариуполь, Украина).

Следует отметить, что мощность локомотивов при всем том уже давно не является сдерживающим фактором. Не считаются ограничением и существующие показатели качества верхнего строения пути, чего нельзя сказать о методах организации перевозочного процесса.

В самом деле, имеет место огромный разрыв между маршрутной скоростью движения грузов (10–12 км/ч) и участковой скоростью товарных поездов (34 км/ч) из-за того, что в среднем через каждые 140 км груз поезда перерабатывается на технических станциях и через 450 км — на сортировочных. Именно поэтому грузы по рельсовой сети перемещаются со скоростью гужевого транспорта.

Сама проблема была осознана ещё в конце 80-х годов прошлого века. И тогда же возникла задача: увеличить пробег поездов без переработки на станциях до 1000 км. Для службы движения это означало разработать новые технологии маршрутизации, при которых не требовалось бы так часто прибегать к услугам технических станций во время рейса, а для вагонного хозяйства — увеличить протяжённость гарантийного участка ПТО ($l_{гп}$) в 4–5 раз.

Подобная комплексная задача должна решаться с большой осторожностью, поскольку при произвольном (не обоснованном научно) изменении $l_{гп}$ в ту или иную сторону железная дорога, как повествуется в известном древнегреческом мифе, непременно может оказаться между Сциллой и Харибдой. При увеличении $l_{гп}$ производительность труда из-за роста маршрутной скорости движения поездов будет увеличиваться, но уровень безопасности на трассе станет понижаться. Если же уменьшается величина $l_{гп}$, то безопасность движения увеличивается, а производительность труда падает. Другими словами, опасность угрожает

соответственно и с той, и с другой стороны.

Без научного обоснования величины $l_{гп}$, по всему видно, не обойтись.

В качестве методической основы к решению этой задачи целесообразно располагать вербальной моделью организации выявления опасных повреждений, т. е. словесным описанием функционирования действующей системы обнаружения имеющегося на конкретном вагоне опасного повреждения.

Упомянутую систему допустимо представить в виде пары осматривающих, действующей по месту нахождения вагона на ПТО, и $(k-1)$ резервных пар их коллег, каждая из которых располагается на своем ПТО по ходу движения поезда. Резервная пара осматривающих соседней станции включается в процесс, если допущен брак на предыдущем предприятии, где не нашли опасного повреждения техники.

Процесс продолжается до тех пор, пока либо одна из $(k-1)$ пар осматривающих обнаружит злополучное повреждение, либо его найдут при диагностике технического состояния вагонов в рамках очередного планового ремонта, если, конечно, не случатся крушение или авария поезда. Здесь k — максимально возможное число попыток обнаружения имеющегося на вагоне опасного повреждения от момента его появления и до постановки вагона в очередной плановый ремонт (деповский или капитальный).

Подчеркнем, объектом рассмотрения и исследования в рамках искомой математической модели должно быть не отдельное ПТО, а множество таких предприятий, через которые проходит вагон в период между плановыми ремонтами, что соответствует значению параметра безопасности вагона ($l_{БД}$) при существующей стратегии проведения деповского ремонта.

Заметим, что нас будет интересовать оптимальное значение протяжённости гарантийного участка ПТО относительно заранее принятого критерия оптимизации.

В качестве объекта оптимизации используем так называемый план контроля





технического состояния (ТС) вагона на интервале $(0; l_{БД})$:

$$D_n = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

где x_i – пробег вагона до i -го ($i = \overline{1, n}$) контроля его технического состояния, начиная отсчет его с нуля; $l_{БД}$ – параметр безопасности вагона, т. е. максимально допустимый пробег вагона между плановыми ремонтами.

Рассматриваемая оптимизационная задача будет решаться в рамках следующих предположений и допущений:

а) поскольку вероятность обнаружения опасного повреждения вагона в условиях ПТО весьма мала по сравнению с вероятностью обнаружения того же повреждения в условиях планового ремонта, то уместно полагать, что при деповском или капитальном ремонте почти со стопроцентной вероятностью выявляются опасные повреждения и полностью восстанавливается работоспособность вагонов;

б) брак в работе осмотрщиков вагонов возможен, однако будем считать, что обнаруженные опасные повреждения или отказы устраняются полностью, т. е. будет исследоваться лишь одна функция ПТО – своевременное выявление имеющих опасных повреждений вагонов;

в) примем как данность, что уровень квалификации осмотрщиков вагонов на соседних ПТО примерно одинаков.

Важной частью решения задачи является вывод формулы целевой функции (ЦФ). В качестве таковой используем функцию так называемых эксплуатационных потерь (ФЭП), которая, как будет показано ниже, должна иметь два аргумента:

ξ – непрерывная случайная величина, под которой понимается наработка вагона до появления (не до обнаружения!) в нём опасного повреждения;

v_i – дискретная случайная величина, которая предназначена для оценки результата контроля технического состояния с целью выявления имеющегося на вагоне опасного повреждения упомянутой парой осмотрщиков вагонов на i -ом ПТО; закон распределения этой случайной величины удобно представить в табличной форме:

v_i	1	0	(2)
	P_i	$1-P_i$	

Здесь P_i – вероятность того, что пара осмотрщиков i -го ПТО обнаружит имеющееся на вагоне опасное повреждение, и следовательно, под выражением $(1-P_i)$ понимается вероятность брака в их работе.

Вероятность P_i зависит от квалификации, технологической и трудовой дисциплины осмотрщиков вагонов, времени суток, погодных условий, контролепригодности вагонных конструкций в момент эксплуатации.

Пока ни на одной из железных дорог мира не существует действующего механизма объективной оценки вероятности $(1-P_i)$, которая характеризовала бы качество контроля технического состояния вагона в процессе использования его по назначению.

Между тем, несколько лет назад в МИИТ была разработана вербальная модель функционирования общесетевой автоматизированной системы контроля (АСК), которая является системой двойного назначения:

- мониторинга качества работы каждого осмотрщика вагонов;
- получения эксплуатационных данных о наработках вагонов до появления (не до обнаружения) опасных повреждений.

Благодаря упомянутым аргументам искомой ЦФ (ξ и v_i) представляется возможным одновременно учитывать прочность и надёжность вагонных конструкций (с помощью ξ), а также упомянутое множество факторов, влияющих на величину брака в работе осмотрщиков (с помощью v_i).

Неслучайные же факторы, влияющие на результат решения рассматриваемой задачи, следует учитывать с помощью двух параметров ЦФ.

Параметр C – затраты на однократный контроль технического состояния вагона:

$$C = 0,16 \frac{S}{N}, \quad (3)$$

где S – среднемесячные затраты на содержание и обеспечение функциониро-

вания ПТО вагонов; N – количество проследовавших вагонов через техническую станцию за указанный период; $0,16$ – удельный вес затрат труда на контроль технического состояния вагонов.

Параметр h – усреднённое значение экономических потерь железной дороги из-за пребывания вагона в скрытом аварийном состоянии в течение единицы времени (или пробега вагона):

$$h = \frac{\pi}{l_{БД}} \cdot R, \quad (4)$$

где π – ожидаемый ущерб от крушения; R – закладываемый риск (вероятность крушения поезда из-за брака в работе осмотрщиков вагонов. Эту величину можно определить по формуле [2]:

$$R = 1 - K_{oe}(l_{БД}^{omm}), \quad (5)$$

где $l_{БД}^{omm}$ – то значение $l_{БД}$, при котором коэффициент оперативной готовности вагонов (комплексный показатель надёжности изделия $K_{oe}(\cdot)$) становится наибольшим.

Допущение, что уровень квалификации осмотрщиков на соседних ПТО примерно одинаков, позволяет опустить индекс при случайной величине v_i , т. е. $v_i \equiv v$ при любом i .

Итак, целевая функция, судя по размерности её аргументов, может быть выражена через компоненты вектора пробегов вагона (1), обозначим её $G_{D_n}(v, \xi)$.

Структура ЦФ такова, что затраты на компенсацию последствий аварий и крушений поездов уравниваются затратами на организацию своевременного обнаружения опасных повреждённых вагонов при их непосредственном использовании в перевозочном процессе. Следовательно, существование экстремума искомой ЦФ не вызывает сомнений.

Поскольку аргументы ЦФ являются случайными величинами, то и сама функция принимает случайные значения. В таком виде она не может использоваться в оптимизационной задаче.

Поэтому ЦФ должна быть подвержена сначала усреднению по случайной величине v , а затем – по случайной величине ξ .

В результате этих операций, описанных в [3], получено математическое ожидание ФЭП (или ЦФ) в следующем виде:

$$MG_{D_n}(\xi) = \int_0^{l_{БД}} G_{D_n}(x) dF(x) + G_{D_n}(l_{БД}) \cdot \bar{F}(l_{БД}), \quad (6)$$

где $MG_{D_n}(\xi) \equiv M_{\xi} [M_v G_{D_n}(v, \xi)]$; $F(x)$ – функция распределения наработки вагона до появления опасного повреждения; $\bar{F}(x) = 1 - F(x)$ – вероятность безотказной работы за время x (функция надёжности).

Под (6) понимается искомое выражение для ЦФ, или усреднённое значение эксплуатационных потерь в период использования вагона в перевозочном процессе между плановыми ремонтами, т. е. в пределах $(0, l_{БД})$.

В [3] приведена методика определения функции распределения $F(x)$ на основе разработанной в МИИТ вербальной модели производства эксплуатационных данных о наработках вагонов до появления в них опасных повреждений.

Поскольку в настоящее время на железных дорог России (и других стран мира) отсутствует работающий механизм производства эксплуатационных данных для идентификации функции распределения наработки вагонов до появления в них опасных повреждений, то на первых порах можно использовать ЦФ (6) в предположении отсутствия информации о $F(x)$.

Этому допущению способствует то обстоятельство, что при увеличении параметра безопасности вагона ($l_{БД}$) первое и второе слагаемые в выражении (6) изменяются монотонно во взаимно противоположных направлениях. Следовательно, существует такая функция $F^*(x)$, на которой достигается максимум эксплуатационных потерь:

$$\max_F MG_{D_n}(\xi). \quad (7)$$



Исходные данные

Фактор	Обозначение	Размерность	Значение
Усреднённое значение ущерба из-за крушения поезда	π	руб.	$360 \cdot 10^6$
Параметр безопасности вагона	$l_{БД}$	мес.	30
Допустимый риск крушения поезда	R	-	10^{-4}
Среднесуточный пробег вагона	$l_{ср.сут}$	км	400

Получаемая погрешность при решении поставленной задачи пойдёт гарантированно в зачет безопасности вагона. Теперь остается на интервале $(0, l_{БД})$ выбрать такой вектор пробегов $D_n = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, когда выражение (7) достигает минимального значения:

$$\min_{D_n} \max_F MG_{D_n}(\xi), \quad (8)$$

которое, собственно, и является искомым критерием оптимизации протяжённости гарантийного участка ПТО грузовых вагонов.

Методика решения подобных минимаксных задач известна [4]. В данном случае оптимальные пробеги x_i ($i = \overline{1, n}$), после которых следует контролировать техническое состояние вагона, могут быть вычислены по формуле:

$$x_i = i \cdot P \cdot \left\{ \frac{l_{БД}}{n^* \cdot P + 1} + \frac{C}{2h} \left(\frac{n^* [(n^* + 1) \cdot P + 2]}{n^* \cdot P + 1} - (i + 1) \right) \right\}, \quad (9)$$

где P – вероятность того, что пара осмотрщиков ПТО обнаружит имеющееся на вагоне опасное повреждение; n^* – наибольшее n , при котором выполняется неравенство

$$Cp^2 n^2 + Cp(2 - p)n + 2(C - phl_{БД}) \leq 0. \quad (10)$$

Как видно из выражения (9), оптимальная периодичность контроля технического состояния вагона переменна, что в принципе возможно использовать на практике с помощью системы «ДИСПАРК», то есть в рамках отраслевой системы своевременной постановки вагонов в плановые виды ремонта по пробегу.

Однако, учитывая минимаксную постановку задачи, вполне допустимо использовать приближённую оценку протяжённости гарантийного плеча ПТО вагонов, получаемую по формуле:

$$l_{cy} = \frac{l_{БД}}{n^*}. \quad (11)$$

Ценность формул (10) и (11) для вычисления оптимальной протяжённости гарантийного участка ПТО вагонов состоит в следующем:

- найдена связь между периодичностью глубокой диагностики ($l_{БД}$) и протяжённостью гарантийного плеча ПТО (l_{cy});
- получена явная зависимость протяжённости гарантийного плеча ПТО от вероятности брака в работе осмотрщиков, а стало быть, и уровня организации производства на предприятии.

Таблица 2

Матрица гарантийных участков ПТО, км

С, руб.	1-P, [-]							
	0,7	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
1	739	853	904	952	1000	1043	1087	1122
1,275	835	963	1020	1078	1128	1176	1228	1276
1,5	907	1045	1111	1169	1224	1278	1329	1379
2	1049	1208	1281	1348	1417	1476	1538	1594
3	1285	1181	1572	1659	1739	1809	1885	1954
4	1487	1714	1804	1914	2004	2093	2182	2258

Задавшись, например, исходными данными таблицы 1 с помощью формулы (11), оценим влияние указанных в ней факторов на величину $l_{гв}$.

Влияние на протяжённость гарантийного участка ПТО ($l_{гв}$) таких важных факторов, как брак в работе осмотровиков вагонов ($1-P$) и затрат на контроль технического состояния вагона (C), представлено в виде матрицы гарантийных участков ПТО (таблица 2).

Из данных таблицы 2 следует, что при увеличении затрат на контроль технического состояния вагона с 2 до 4 руб. безостановочный пробег вагона при вероятности брака в работе осмотровиков 0,55 может быть увеличен с 1281 до 1804 км, т. е. на 523 км. Расчёты показали, что при $l_{бд}=20$ мес. упомянутый пробег может вырасти с 854 до 1203 км, т. е. на 349 км. Тем самым улучшаются показатели маршрутной скорости поез-

дов, уменьшается оборот вагона, а также сокращаются совокупные затраты вагонного линейного хозяйства за счёт уменьшения количества ПТО.

Следовательно, имеется возможность решить и немаловажную обратную задачу – определить, какие мероприятия следует провести и какими ресурсами требуется располагать на их реализацию, чтобы увеличить маршрутную скорость поездов, скажем, в 2–4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вагонное хозяйство: Учебник / Под ред. П. А. Устича – М.: Маршрут, 2003. – 560 с.
2. Устич П. А., Иванов А. А., Садчиков П. И. Формула риска и показатели безопасности // Мир транспорта. – 2006. – № 2. – С. 18–23.
3. Методические основы разработки системы управления техническим состоянием вагонов: Учебное пособие / Под ред. П. А. Устича – М.: Маршрут, 2015. – 711 с.
4. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. – М.: Высшая школа, 1982. – 231 с. ●

Координаты авторов: Устич П.А., Иванов А.А. – wwx720@mail.ru, Емельянов Д. Ю. – gooddima2007@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 10.11.2014, принята к публикации 07.02.2015.

Статья подготовлена на основе материалов, представленных авторами на Международной научно-практической конференции «Конструкция, динамика и прочность подвижного состава», посвященной 75-летию со дня рождения В. Д. Хусидова (МИИТ, 20–21 марта 2014 года).

CALCULATION OF THE WARRANTY SECTION OF A MAINTENANCE POINT OF FREIGHT CARS

*Ustich, Petr A., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Ivanov, Alexander A., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.
Emelianov, Dmitry Yu., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.*

ABSTRACT

A verbal model of work of car inspectors and mathematical model of design-based justification of the warranty section of freight cars maintenance enterprise are considered. At the same time indicators of reliability and safety of the car, the

acceptable crash risk level, likelihood that a car inspector will not find them inoperable (foozle in his work) are taken into account. A test example shows the effect of operating parameters on the frequency of the technical control.

Keywords: railway, warranty section of maintenance depot, frequency of monitoring the technical condition of the car, the probability of defect during the inspection, verbal model, mathematical model, security parameters of the car, design-basis justification.

Background. *The task of increasing the length of the non-stop running of trains is much more serious than it may seem at first glance.*

More than half a century ago, a professor of MIIT, L. A. Shadur and his students showed that increasing the weight of trains at the expense of increasing the linear loads of cars is the most appropriate in terms of slowing down the degradation of the most capital-

intensive element of railways which is the track superstructure. In addition, this approach does not require elongation of station tracks.

Under the leadership of L. A. Shadur eight-axle tanks and gondola cars were developed, which became a means of implementing higher linear loads. So, a train, consisting of these eight-axle gondola cars, can carry 43% more coal, ore and other goods

