



ВЛИЯНИЕ НА ЕКСПЛОАТАЦИОННОТО НАТОВАРВАНЕ ВЪРХУ РЕСУРСА НА ТРАНСПОРТНИ МАШИНИ

Георги Генадиев

ggenad@abv.bg

***Катедра “Транспортна техника”, ВТУ “Т. Каблешков” - София 1574,
БЪЛГАРИЯ***

Ключови думи: *надеждност, ресурс, експлоатационно натоварване*

Резюме: *Влиянието на характера на натоварването върху ресурса е слабо третирана област в известната ни литература. Тук се разглеждат:*

- *общото натоварване на машините като пълен спектър на натоварването;*
- *стеснените натоварвания като частични спектри на разделения пълен спектър – в смисъла на тесни непрепокриващи се или слабо препокриващи се спектри на натоварването.*

При тази постановка се изследва влиянието на диференцираното натоварване върху средния ресурс на машините и съставлящите ги възли, агрегати и пр. Излага се един интересен ефект: експлоатирането по частични спектри на натоварването дава печалба на ресурс. Този ефект се доказва:

- *Теоретично се изследва и съпоставя ресурсът на транспортните машини – при частични спектри и при пълен спектър на натоварването.*
- *Статистически се изследват междуремонтните пробези на дизелови локомотиви.*

1. Увод

Ресурсът на транспортните машини зависи от следните два основни фактора:

- **натоварването;**
- **ефективността на ремонтите, възстановяващи тяхната работоспособност.**

Транспортните машини са конструирани за определено експлоатационно натоварване. Натоварването се представя със сили, механични напрежения, спектри на натоварването и пр., които определят нормираната дълготрайност на машините. Тя подлежи на доуточняване в процеса на експлоатацията, тъй като зависи от реализираното там натоварване.

Съществува потребителски стремеж машините да се експлоатират с пълното налично натоварване. Този стремеж даже може да бъде експлоатационно-методическа постановка при експлоатирането например на локомотивите: всеки локомотив от локомотивното депо да обслужва всички влакове.

Но дали общоприетото е добро или оптимално от гледна точка на надеждността? Възможно е и разпределено натоварване, когато една група машини теглят големите товари в тежките участъци, а друга група – малките товари в леките участъци. Тогава може да се говори за разделено натоварване на две нива, които съответстват на два леко препокриващи се спектъра на експлоатационното натоварване. Явно е, че леките частични спектри удължават дълготрайността, докато тежките частични спектри – обратно, съкращават същата. Тогава и средният ресурс на всичките машини предполагаемо е по-различен от техния нормиран ресурс.

2. Ремонти и възстановяване на работоспособността

Възможните стойности на междуремонтния пробег са продукт както на последния ремонт, така и на предишните ремонти.

Ремонтите на транспортните машини са регламентирани в съответните инструкции за експлоатация и ремонт. Те се извършват в различен обем и с различна степен на диагностично-възстановителните работи. Следователно, те реализират различна степен на възстановяване на изходното заводско-производствено състояние. Всеки ремонт е планов или извънпланов. Ремонтното предприятие отстранява два вида откази:

- “планирани” – при плановите ремонти;
- непланирани – при случайните (аварийните) ремонти.

След ремонта превозвачът получава една обновена машина, без в действителност да знае колко “нова” е станала машината. Неговият практически интерес се свежда основно до това, – машината да не дава непланирани откази.

Междуремонтният пробег е най-информативният показател за следремонтното състояние на машината. Пробегът до следващия ремонт се генерира от моментната **експлоатационна якост** [1].

3. Степен на пропуските и физически смисъл на експлоатационната якост

От физическа гледна точка по-голямата експлоатационна якост съответства на по-голям обем и по-високо качество на диагностично-ремонтните работи – те заедно определят **степеня на възстановяването** – V , и нейната обратна величина – **степеня на пропуските** – P [1]. Последната зависи не само от нивото на диагностично-ремонтните пропуски, но и от обхвата (обема) на технологично предписаните ремонтни операции.

За възлите и детайлите в транспортната машина експлоатационната якост се изразява с налични характерни параметри на дълготрайността: дебелина на закален или на незасегнат от умората метален слой, изходна граница на якост, изходна пукнатиноустойчивост, изходен геометричен параметър (например хлабина) и др., които формират остатъчния ресурс (ресурси). Тогава степента на пропуските съответства на недостигането на определени ремонтни норми за същите тези параметри – в детерминистичен аспект. В групите от сложни машинни обекти експлоатационната якост има случаен характер – експлоатационна якост във вероятностен аспект.

4. Въвеждане в един модел

Нека мислено транспортната машина да е оставена без профилактика. При тези условия се разглежда случайната величина междуремонтен пробег L . Величината L зависи от два фактора: степента на пропуските – P , и експлоатационното натоварване, разбирано като спектър на натоварването – E . Следователно, $L \equiv L_{rep}(P, E)$, където L_{rep} е друго означение на междуремонтния пробег. Пояснява се, че P и E са случайни величини. Величината P изразява изходното експлоатационно състояние на ремонтираната машина. Транспортната машина е сложен машинен обект и величината P не може да бъде описана изчерпващо или дефинирана пряко. Тази величина обаче реално присъства у ремонтираната машина.

На всяка отделна стойност p на случайната величина P съответства някакво изходно качество на ремонтираната машина. То се “изразходва” през времето на експлоатацията. Тогава под $L(p) \equiv L_{rep}(p \in P, E)$ се разбира случайната величина междуремонтен пробег, формирана от p и E .

Съответната вероятност за безотказна работа на машината е:

$$(1) \quad R(p, l) = Pr\{L(p) > l\},$$

където:

- $R(p, l)$ е вероятността за безотказна работа при степен на пропуските – p , и текущ пробег l ;
- Pr е означението за вероятност.

Изхожда се от съществуването на линеен модел в следния смисъл: съществува такава положителна функция $r(p)$, че пробезите $L(p)$ и $\frac{r(p')}{r(p)}L(p')$ са еднакво разпределени при стойностите p и p' на степента на пропуските.

В [1] са обосновани характерни свойства на функцията $r(p)$: нарастваща монотонност, непрекъснатост и диференцируемост. Тези свойства са полезни за следващите резултати.

Функцията $r(p)$ има смисъл на **скорост на изразходване на ресурса** след ремонта – при степен на пропуските $p \in P$, без да има дименсия на скорост. Това понятие е заимствано от [2].

Ако p_{fix} е фиксирана стойност на P , пробезите $L(p)$ и $\frac{r(p_{fix})}{r(p)}L(p_{fix})$ са еднакво разпределени и в съответствие с линейния модел:

$$(2) \quad R(p, l) = Pr\{L(p) > l\} = Pr\left\{\frac{r(p_{fix})}{r(p)}L(p_{fix}) > l\right\} = \\ = Pr\left\{L(p_{fix}) > \frac{r(p)}{r(p_{fix})}l\right\} = R\left(p_{fix}, \frac{r(p)}{r(p_{fix})}l\right) = R_{p_{fix}}\left(\frac{r(p)}{r(p_{fix})}l\right),$$

където:

- p_{fix} приема ролята на параметър на R ;
- $R_{p_{fix}}(l)$ е вероятността за безотказна работа при избраната степен на пропуските – p_{fix} , и текущ пробег l .

Дефинира се вероятността за безотказна работа – $R_d(l)$, при случайната степен на пропуските – P , – като математическо очакване на случайната величина $R(P, l) = R_{p_{fix}}\left(\frac{r(P)}{r(p_{fix})}l\right) = R_{p_{fix}}(\rho(P)l)$:

$$(3) \quad R_d(l) = \int_{\underline{p}}^{\bar{p}} R(p, l) dF_P(p) = \int_{\underline{p}}^{\bar{p}} R_{p_{fix}}\left(\frac{r(p)}{r(p_{fix})}l\right) dF_P(p) = \\ = \int_{\underline{p}}^{\bar{p}} R_{p_{fix}}(\rho(p)l) f_P(p) dp,$$

където:

- $\rho(p)$ и $f_P(p)$ са съответно функцията и плътността на разпределението на вероятността на P ;
- функцията $\rho(p) = \frac{r(p)}{r(p_{fix})} = s$ е относителната скорост на изразходването на ресурса;
- означението p придобива смисъла на текуща стойност на P ;
- \underline{p} и \bar{p} – съответно долната и горната граници на дефиниционния интервал на P .

5. Вероятността за безотказна работа – в зависимост от скоростта на изразходването на ресурса

След известни преобразувания се получава [1]:

$$(4) \quad R_d(l) = \int_{s_{min}}^{s_{max}} R_{p_{fix}}(sl) f_S(s) ds ,$$

където:

- $s_{min} = \rho(\underline{p})$; $s_{max} = \rho(\bar{p})$;

- $f_S(s)$ е плътността на разпределението на случайната величина $R(p, l)$.

Тогава за $p_{fix} = \bar{p}$:

$$(4') \quad R_d(l) = \int_{s_{min}}^{s_{max}} R_{\bar{p}}(sl) f_S(s) ds .$$

Величината S е производна от величината P и изразява случайната относителна скорост на изразходването на ресурса. Физическото присъствие на двете величини в ремонтираните машини е безспорно. Тяхното оценяване обаче изглежда проблематично.

Предлага се едно полезно дефиниране на S във вида [1,3]:

$$(5) \quad S = \frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{L(e_{fix})} ,$$

където:

- e_{fix} е фиксирана стойност на натоварването;

- $l(p_{fix}, e_{fix}) = L_{rep}(p_{fix} \in P, e_{fix} \in E)$ – стойността на междуремонтния пробег при p_{fix} и e_{fix} ;

- $L(e_{fix}) \equiv L_{rep}(P, e_{fix} \in E)$.

Аналогичният пробег $L(p_{fix})$ е наречен **базов пробег**.

За $p_{fix} = \bar{p}$:

$$(5') \quad S = \frac{l(\bar{p}, e_{fix})}{L(e_{fix})} .$$

От (5) или (5') се вижда, че S се дефинира като отношение на реализация на базовия пробег към съответния пробег, продукт на случайната степен на пропуските – и в числителя, и в знаменателя фигурира едно и също натоварване (e_{fix}); колкото пробегът в знаменателя е по-голям, толкова S е по-малка, и обратно.

Междуремонтният пробег при възможно най-голяма степен на пропуските – \bar{p} , е пробегът на най-слабите машини. Това са машините с минимална дълготрайност, чиято отработка може да се опише с разпределение на

екстремални стойности. От тези и други съображения за пробезите $L(\bar{p}) \equiv L_{rep}(\bar{p} \in P, E)$ и $L \equiv L_{rep}(P, E)$ е избрано разпределението на Вейбул (*Weibull*). Стойностите на $L(\bar{p})$ са подмножество на стойностите на L . Моделът изисква еднакво присъствие на натоварването при формирането на тези два пробегата. Оправдано е да считаме, че характерът на натоварването на най-слабите машини не се различава от този на всичките машини.

6. Едно интегрално уравнение на Фредхолм – решение, проблеми

Уравнението (4') приема вида [4]:

$$(6) \quad \int_{s_{min}}^{s_{max}} \exp\left(-\left(\frac{ls}{a}\right)^b\right) f_S(s) ds = \exp\left(-\left(\frac{l}{a_d}\right)^{b_d}\right),$$

където:

- $a = a_{\bar{p}}$ и a_d са съответно параметрите на мащаба на разпределението на Вейбул за $L(\bar{p})$ и L ;
- $b = b_{\bar{p}}$ и b_d – съответно параметрите на формата.

По отношение на плътността $f_S(s)$ уравнението е интегрално уравнение на Фредхолм (*Fredholm*) от първи род. В подинтегралния израз е “конструирана” генерираща функция за полиномите на Чебишев-Лагер (*Chebyshev-Laguerre*) [4]. Обоснована е задоволителната ортогоналност на полиномите – при определени условия. Дясната страна на уравнението (6) е представена в степенен ред. Полученото решение има вида:

$$(7) \quad f_S(s) = b s^{b-1} \exp\left(-k(s^b - s_{min}^b)\right) \sum_{j=0}^{n_{pol}-1} c_{\sigma^* j} (s^b - s_{min}^b)^j,$$

където:

- $k = a^{-b}$;
- n_{pol} е броят на полиномите;
- $c_{\sigma^* j}$ – коефициенти, продукт на преобразуването на ядрото на

интегралното уравнение – до произведение на генериращата функция за полиномите и определено тегло на ортогоналността.

Достигането до решението е достатъчно дълъг път, за да може да бъде изложено тук. Отбелязва се само, че представянето на преобразуваната дясна страна на уравнението в степенен вид е проблематично по отношение на точността на апроксимирането. Установена е необходимостта от завишена точност, гарантираща устойчивостта на решението [5]. Използвани са утвърдени подходи към определен клас некоректни задачи [6, 7].

За плътността на разпределението на случайния пробег $L(e_{fix})$ е получено:

$$(8) \quad f_{L(e_{fix})}(x) = \frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{x^2} f_S\left(\frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{x}\right),$$

където $f_{L(e_{fix})}$ е означението на плътността на този пробег.

В транспортната машина e_{fix} се тълкува като “отрязък” от общия спектър на експлоатационното натоварване E . Под действието на e_{fix} се формира реализацията $l(p_{fix}, e_{fix})$. Същият спектрален “отрязък” условно многократно се прилага при формирането на пробега $L(e_{fix})$. Решението (8) обаче не изисква точно количествено изразяване на p_{fix} и e_{fix} .

7. Косвена оценка на степента на пропуските

Явно е, че степента на пропуските не може да бъде измерена. Нейното реално присъствие тук се оценява с отношението:

$$(9) \quad \frac{M[L(e_{fix})]}{l(p_{fix}, e_{fix})} = \frac{L(e_{fix})_m}{l(p_{fix}, e_{fix})},$$

където:

- тук и по-нататък M е означението на математическото очакване;
- индексът m означава “средна стойност”.

Отношението (9) би отразило косвено степента на пропуските, само ако не зависи от натоварването. Това се проверява при полагането $\frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{x} = s$:

$$(9') \quad \begin{aligned} \frac{L(e_{fix})_m}{l(p_{fix}, e_{fix})} &= \frac{I}{l(p_{fix}, e_{fix})} \int_{l(e_{fix})_{min}}^{l(e_{fix})_{max}} \frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{x^2} f_S\left(\frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{x}\right) x \, dx = \\ &= \frac{I}{l(p_{fix}, e_{fix})} \int_{s_{max}}^{s_{min}} s f_S(s) \left(-\frac{l(p_{fix}, e_{fix})}{s^2}\right) ds = \int_{s_{min}}^{s_{max}} \frac{f_S(s)}{s} ds = \\ &= const = \beta_p = \frac{L(e_{fix}^i)_m}{l(p_{fix}, e_{fix}^i)}, \end{aligned}$$

където:

- $l(e_{fix})_{min}$ и $l(e_{fix})_{max}$ са съответно долната и горната граници на дефиниционния интервал на $L(e_{fix})$;
- e_{fix}^i – произволно избрана фиксирана стойност на натоварването.

От последния израз следва, че отношението (9) наистина не зависи от натоварването: постоянната величина β_p не зависи от избора на e_{fix} . Величината β_p :

- зависи само от скоростта на изразходването на ресурса – последната е производна величина от степента на пропуските;

- в практически аспект изразява увеличаването на пробега $L(e_{fix}^i)_m$ спрямо “генериращата” го реализация $l(p_{fix}, e_{fix}^i)$ на базовия пробег $L(p_{fix})$;

- е едномерен относителен критерий за възстановителната ефективност на системата за диагностиране и ремонт.

Всички пробеги $L(e_{fix}^i)_m$ заедно съставят случайния пробег Λ_m :

$$(10) \quad \Lambda_m = \beta_p L(p_{fix}) .$$

За средния пробег $\Lambda_{m,m} = M[\Lambda_m]$ е получено [3]:

$$(11) \quad L_{m,m} = b_p L(p_{fix})_m ,$$

където $L(p_{fix})_m = M[L(p_{fix})]$.

Пробегът $\Lambda_{m,m}$ е средният ресурс в разглеждания модел. Тук пълният спектър на натоварването е разделен на частични – тесни непрепокриващи се, спектри (на практика са леко препокриващи се тесни спектри).

8. Методическите подходи към съставянето на графика на оборота на локомотивите

Известен е експлоатационният стремеж *всеки локомотив да обслужва последователно всички влакове, включени в графика за движение*, т.е. леки и тежки влакове. Нека това условно е **експлоатационно-методическа постановка тип А** (тя съответства на **единния график** на оборота на локомотивите, при които условията за тяхната работа са изравнени).

Изложените в настоящата работа резултати се използват за формулиране на **експлоатационно-методическа постановка тип В** (съответства на **силно свит групов график** на оборота на локомотивите):

В рамките на междуремонтните пробеги всеки локомотив се натоварва с “отрязък” от общия спектър на натоварването. “Разрязването” на общия спектър на тесни части и тяхната стабилност се гарантират само с организационни мероприятия:

- всеки локомотив обслужва възможно най-малка група влакове;
- във всяка група са включени влакове под стеснено натоварване – според теглото на подвижния железопътен състав и “теглото” на железопътния участък;

- съществува стремеж за обслужване на железопътните подвижни състави с постоянни бригади;

- други.

Средният пробег при постановката тип А е $L_m = M[L]$.

Средният пробег при постановката тип В е $\Lambda_{m,m}$.

9. Някои получени резултати – тълкуване

В таблица 1 са дадени резултати от сравнителното изследване на две серии дизелови локомотиви, експлоатирани от Българските държавни железници – серия 04 и серия 06. Горните индекси “звездичка” в таблицата означават статистически оценки на съответните параметри и характеристики. Тези оценки са пояснени в [3]. С $\delta \bar{p} \approx p_{fix}$ е означен много тесен интервал на максималните стойности на степента на пропуските. Тук се отчита фактът, че най-неефективните възстановявания на локомотивите са леко разсеяни.

От сравнението на графите 8 и 9 в таблицата 1 произтича предимството на методическата постановка тип В: средният пробег $\Lambda_{m,m}$ е по-голям от средния пробег L_m .

Следователно, експлоатирането по тесни спектри на натоварването може да удължи ресурса на машините.

Това не са изолирани резултати. Посочват се и други авторски изследвания, които потвърждават изложения извод – например [8], [9], [10], [11] и [12].

10. Заключение

Тук се предлага необичаен методически подход към експлоатирането на транспортните машини: експлоатационна работа, при условие, че пълното натоварване е диференцирано или разделено на тесни интервали. Тогава средната дълготрайност на машините обикновено надхвърля нормираната дълготрайност. Това може да се постигне без нови капиталовложения, а само с цената на организационни мероприятия при достатъчен наличен машинен парк.

Направеното заключение заслужава внимание, защото означава печалба на ресурс.

Параметри и характеристики за дизелови локомотиви:

Таблица 1.

Локомотиви, серия	a^* , km	b^*	a_d^* , km	b_d^*	β_p^*	$L^*(\delta \bar{p})_m$, km	$\Lambda_{m,m}^*$, km	L_m^* , km
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
04	931	0,858	13 989	0,899	19,689	979	19 275	14 718
06	456	0,634	12 267	0,706	39,166	577	22 599	15 533

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГЕНАДИЕВ, Г. Обратна задача в надеждността на транспортни обекти: оценка на експлоатационната якост по информация за ремонтните възстановявания. ВВТУ “Т. Каблешков”. 10-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 249-255. С., 1997.
- [2] КРИВОЛАПОВ, С. Я. Точечная и интервальная оценки вероятности безотказной работы изделия с учетом распределения нагрузки при его эксплуатации. *Надежность и контроль качества*, (1990), № 5, с. 8-12. М., 1990.
- [3] ГЕНАДИЕВ, Г. Метод за оценяване на ефективността на системите за техническо обслужване и ремонт на железопътната техника. *Железопътен транспорт*, (1998), № 3, с. 30-33. С., 1998.
- [4] ГЕНАДИЕВ, Г. Модел на експлоатационната якост с полиноми на Чебишев-Лагер. ВВТУ “Т. Каблешков”. 10-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 256-263. С., 1997.
- [5] ГЕНАДИЕВ, Г. Проблеми на устойчивостта на оценките в надеждността на транспортни машини и системи. ВВТУ “Т. Каблешков”. 10-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 264-271. С., 1997.
- [6] ТИХОНОВ, А. Н., В. Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. М., Наука, 1979.
- [7] ТИХОНОВ, А. Н. и др. Численные методы решения некорректных задач. М., Наука, 1990.
- [8] ГЕНАДИЕВ, Г. Ресурси под смесено и диференцирано натоварване. ВТУ “Т. Каблешков”. 11-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 159-164. С., 2001.
- [9] ГЕНАДИЕВ, Г. Сравнителна оценка на ресурсите на машинните детайли при смесено и разделено дискретно циклично натоварване. ВТУ “Т. Каблешков”. 11-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 263-268. С., 2001.
- [10] ГЕНАДИЕВ, Г. Сравнителна оценка на ресурсите на машинните детайли при пълни и разделени спектри на натоварването. ВТУ “Т. Каблешков”. 11-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 269-274. С., 2001.
- [11] ГЕНАДИЕВ, Г., М. ТЕОФИЛОВА. Трибологичен характер на смесеното и разделеното натоварване на детайлите. ВТУ “Т. Каблешков”. 12-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 201-204. С., 2002.
- [12] ГЕНАДИЕВ, Г. Влияние температурных режимов на ресурс изоляционных материалов электрических машин. ВТУ “Т. Каблешков”. 12-та научна конференция. *Сборник доклади*, с. 307-312. С., 2002.

EFFECT OF OPERATIONAL LOADING ON LIFE OF TRANSPORT MACHINES

Georgi Genadiev

Keywords: *reliability, life, operational loading*

Summary: *The effect of the loading character on the life has been little studied and cannot be found in references known up to now. The paper examines:*

- *general loading of machines as a complete spectrum of loading;*
- *narrow loading as partial spectra of divided complete spectrum of loading – in the sense of narrow non-covering or little covering each other spectra of loading.*

The effect of differentiated loading on the average life of machines and their units has been studied. The paper presents an interesting result: the operation by means of partial spectra of loading prolongs the life of machines. The result has been proved:

- *The paper presents and compares a theoretical examination in the life of transport machines: with partial spectra and complete spectrum of loading.*
- *The run between repairs of diesel locomotives has been examined statistically.*