

УДК 630.3

DOI: 10.15393/j2.art.2017.3701

Статья

Расчёт ресурса и количества запасных частей по результатам незавершённых испытаний

Вениамин Н. Шиловский¹, Александр В. Питухин¹ и Вадим М. Костюкевич^{1,*}

¹ Петрозаводский государственный университет, пр. Ленина, д. 33, 185910, Петрозаводск, Россия; E-Mails: shilovsky@petrsu.ru; pitukhin@petrsu.ru; vadim9595@yandex.ru

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: vadim9595@yandex.ru; Tel.: +7(8142)775003; Fax: +7(8142)571317.

Получена: 18 апреля 2017/ Принята: 18 мая 2017/ Опубликована: 28 июня 2017

Аннотация: В статье представлены и апробированы на деталях тракторов Онежского Тракторного Завода методические положения по определению величины расхода запасных частей по величине среднего ресурса деталей и узлов лесной машины, определяемого по данным незавершённых испытаний машин согласно планам [NUT] или [NUr]. Исходными данными для расчетов являлись выборки статистических данных о наработках до предельного состояния деталей лесных машин. Проведен расчет величины расхода запасных частей по данным испытаний согласно плану [NUr] при нормальном законе распределения ресурса для 43 тракторов Онежского тракторного завода. Данная методика может быть использована и для других лесных машин, в том числе и зарубежного производства.

Ключевые слова: запасные части; ресурс; расход запасных частей; план испытаний.

DOI: 10.15393/j2.art.2017.3701

Article

Calculation of the resource and the number of spare parts based on the results of incomplete tests

Veniamin N. Shilovsky¹, Alexander V. Pitukhin¹ and Vadim M. Kostyukevich^{1,*}

¹ Petrozavodsk State University, Lenin av. 33, 185910 Petrozavodsk, Russia; E-Mails: shilovsky@petsu.ru; pitukhin@petsu.ru; vadim9595@yandex.ru

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: vadim9595@yandex.ru; Tel.: +7(8142) 775003; Fax: +7(8142)571317.

Received: 18 April 2017 / Accepted: 18 May 2017 / Published: 28 June 2017

Abstract: Methodical provisions for determining the value of the spare parts use for the average life of parts and components of the forest machine, determined from the data of incomplete machine testing according to the plans [NUT] or [NUr] and tested on the details of the tractors of the Onega Tractor Plant are presented in the article. The initial data for the calculations were samples of statistical data on the operating time to the limiting state of the details of forest machines. Calculation of spare parts use according to the [NUr] plan under the normal distribution law of resource for 43 tractors of the Onega Tractor Plant was carried out. This technique may be used for other forest machines, including foreign ones.

Keywords: spare parts; resource; consumption of spare parts; test plan.

1. Введение

Рассмотрим способы расчёта потребного количества запасных частей на основе величины их среднего ресурса, определяемой по планам незавершённых испытаний [NUT] и [NUr], согласно работам [1—5, 9], т. к. для использования плана завершённых испытаний [NUN] необходимым условием является замена всех без исключения находящихся под наблюдением узлов (деталей), что на практике происходит весьма редко, требует большой длительности испытаний.

Предполагается, что случайная величина (в данном случае значение ресурса) при использовании планов [NUT] и [NUr] распределяется по нормальному, экспоненциальному законам или закону Вейбулла [8, 10].

В соответствии с работами [2, 10] план [NUr] ([NUT]) — это план испытаний, согласно которому одновременно испытывают N объектов, отказавшие во время испытаний объекты не восстанавливают и не заменяют, испытания прекращают, когда число отказавших объектов достигло r по истечении наработки T . Основными исходными данными для расчётов по плану наблюдения [NUr] являются выборки статистических данных о наработках до предельного состояния (замен) деталей (узлов) исследуемых машин. При этом из общей выборки наработок до замены исключаются повторно отказавшие детали, т. е. рассматривается только первая замена данной детали на определённой машине.

При испытаниях по плану [NUT] из общей выборки, кроме повторных замен деталей на одной и той же машине, исключаются и все замены, произошедшие на машинах, не отработавших установленную продолжительность испытаний T , независимо от того, сняты ли они уже с наблюдений или ещё находятся под наблюдением. Машины, не отработавшие продолжительность испытаний T , исключаются из общей выборки, а значит, и проведённые на них замены деталей. Кроме того, из общей выборки исключаются и все наработки до замены свыше продолжительности испытаний T . Установленная продолжительность испытаний T определяется эмпирическим путём таким образом, чтобы не менее 70 % испытываемых машин имели наработку больше T и, таким образом, попадали в статистическую выборку [3, 6, 10].

2. Материалы и методы

Согласно работам [3, 9, 10, 12], методика расчёта среднего ресурса и количества запасных деталей реализуется в следующем порядке.

Составляются статистические выборки из наработок машин на момент цензурирования и наработок до предельного состояния их деталей. Из перечня отказов выбираются все наработки $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$ исследуемой детали (узла) до её первой замены на каждой машине. Из формируемой выборки исключаются наработки деталей до замены согласно вышеприведённым положениям (повторно отказавшие детали). При расчётах по плану [NUT]

из цензурированной выборки машин исключаются машины, не отработавшие наработку T . Имеющиеся выборки потока наработок машин и деталей располагаются в виде возрастающих вариационных рядов ($t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_i \leq \dots \leq t_m$). Эмпирический ряд распределения ресурса m деталей из цензурированной выборки N объектов по критериям согласия проверяется на соответствие какому-либо теоретическому закону распределения.

Общее число испытываемых объектов (N) равно:

$$N = A \cdot n, \quad (1)$$

где n — применяемость детали (узла);

A — число машин под наблюдением, шт.

Расчёт среднего ресурса T_{cp} при числе наблюдаемых по плану [NUr] объектов $N > 15$ проводится в следующей последовательности. Вычисляем оценку математического ожидания случайной величины M , среднеквадратического отклонения σ , коэффициента вариации v .

$$M = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m t_i, \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (t_i - M)^2, \quad (3)$$

$$v = \frac{\sigma}{M}, \quad (4)$$

где m — объём выборки (число деталей, заменённых после первого ресурсного отказа); t_i — отдельные значения наработок до замены, маш. ч. (мото-ч.).

Согласно работам [7, 9, 11], определим промежуточные вспомогательные параметры p и ω .

$$p = \frac{\sigma^2}{(M - t_m)^2}, \quad (5)$$

где t_m — максимальное значение наработки в выборке m ;

$$\omega = \frac{N - m}{N}. \quad (6)$$

Величина среднего ресурса определяется по выражению

$$T_{cp} = M - k \cdot (M - t_m), \quad (7)$$

где k — табличный коэффициент, зависящий от параметров P и ω [9, 11].

Величина среднего ресурса при числе объектов $N \leq 15$ определяется по формуле

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot t_i, \quad (8)$$

Коэффициент α_i определяется из таблиц [6, 9, 11] в зависимости от величин N и m .

Средний ресурс деталей при плане наблюдений [NUT] при числе объектов $N \leq 15$ и при соответствии распределения ресурса нормальному распределению определяется по выражению [6, 9, 11]:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot t_i - \mu \cdot \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_i, \quad (9)$$

где β_i, α_i, μ — табличные коэффициенты.

Коэффициенты β_i, α_i , определяются из таблиц в зависимости от величины N и m . Значение коэффициента μ определяется по значению коэффициента ϕ , определяемому по выражению [6, 9, 11]

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_i}{T - \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot t_i}, \quad (10)$$

где T — продолжительность испытаний.

Порядок расчёта величины расхода запасных частей при нормальном законе распределения их ресурса состоит в следующем.

- а) По приведённым формулам (2), (3), (4) вычисляются параметры M, σ, v .
- б) Рассчитывается квантиль нормального распределения U_g по выражению

$$U_g = \frac{L - T_{cp}}{\sigma}. \quad (11)$$

где L — плановый (нормативный) восьмидесятипроцентный ресурс лесной машины в моточасах, устанавливаемый заводом-изготовителем.

- в) По табличным данным [6, 9, 11] определяются параметры: Z_g и доверительная вероятность $g(L)$ в зависимости от величины квантиля нормального распределения U_g .
- г) Рассчитывается обеспечиваемый запасными частями календарный период T_0' (в годах) по формуле

$$T_0' = \frac{T_0}{t}. \quad (12)$$

где t — среднегодовая наработка машин данной марки, мото-ч.; T_0 — оценка фактического среднего срока службы машины до предельного состояния, мото-ч.

Величина расхода детали (узла) h на 100 машин в год определится по формуле [6, 9, 10]

$$h = \frac{100 \cdot n}{T_0'} \cdot [v \cdot Z_g + 0.5 \cdot g(L)] \quad (13)$$

где n — применимость детали (узла).

3. Результаты оценки ресурса деталей и величины расхода запасных частей

Проведём расчёт величины расхода запасных частей по данным испытаний, согласно плану [NУr], при нормальном законе распределения ресурса и числе наблюдаемых деталей $N > 15$.

В процессе испытаний на надёжность 43 тракторов Онежского тракторного завода (ОТЗ) были заменены 9 одноимённых шестерён коробки передач, причём две из них повторно. Исключив повторные замены из статистической выборки наработок до замены, получим следующий ряд этих наработок: 1326, 1727, 1892, 2082, 3146, 3621, 3769 мото-ч. Следовательно, в данном случае $N = 43$, $m = 7$.

Вычислим среднеарифметическое M , среднеквадратическое отклонение σ , коэффициент вариации v :

$$M = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m t_i = \frac{1}{7} \cdot 17553 \approx 2508 \text{ мото-ч.}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (t_i - M)^2} = \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 5781477} \approx 982 \text{ мото-ч.}$$

$$v = \frac{\sigma}{M} = \frac{982}{2508} = 0.392.$$

Далее определим значения параметров σ^2 , p , ω :

$$\sigma^2 = \frac{5781477}{6} = 963579.5;$$

$$p = \frac{\sigma^2}{(M - t_m)^2} = \frac{963579.5}{(2508 - 3769)^2} = 0.607;$$

$$\omega = \frac{N - m}{N} = \frac{43 - 7}{43} = 0.837.$$

При данных значениях параметров табличные значения коэффициента $k = 2.899$ [6, 10].

Тогда средний ресурс шестерни равен:

$$T_{cp} = M - k \cdot (M - t_m) = 2508 - 2.899 \cdot (2508 - 3768) = 6161 \text{ мото-ч.}$$

Квантиль нормального распределения U_g в данном случае равен:

$$U_g = \frac{L - T_{cp}}{\sigma} = \frac{6000 - 6161}{982} = -0.164.$$

По данным значения U_g имеем следующие табличные значения доверительной вероятности $q(L) = 0.435$ и параметра $Z_g = 0.323$ [6, 10].

Для определяемого, обеспечиваемого запасными частями календарного периода T'_0 имеем следующие данные. Согласно данным испытаниям на надёжность, среднегодовая наработка t рассматриваемых тракторов составляет 903 мото-ч., а средний фактический ресурс T_0 равен 3786 мото-ч. По этим данным имеем:

$$T'_0 = \frac{T_0}{t} = \frac{3786}{903} = 4.19 \text{ года.}$$

Величина расхода шестерни, согласно формуле (13), составляет:

$$h = \frac{100 \cdot n}{T'_0} \cdot [v \cdot Z_g + 0.5 \cdot g(L)] = \frac{100 \cdot 1}{4.19} \cdot [0.392 \cdot 0.323 + 0.5 \cdot 0.435] = 8.2 \text{ шт.}$$

Можем принять $h = 8$ на 100 тракторов в год.

Расчёт среднего ресурса по данным наблюдений за технологической машиной по плану [NUT] при нормальном законе ресурса детали и числе наблюдаемых объектов $N \leq 15$ проведён на примере соединительного пальца срезающего механизма лесозаготовительной машины (ЛЗМ).

В процессе испытаний на надёжность 18 ЛЗМ было зафиксировано 13 замен соединительного пальца (применяемость $n = 1$), в том числе восьми повторных [5, 9, 10]. Необходимо исключить из выборки те наработки, которые указаны в изложенных выше методических положениях. Для этого все данные представлены в таблицах 1 и 2.

Как видно из таблицы 1, в статистической выборке машин, по которым нужно учитывать замены, находятся 12 машин, что составляет примерно 70 % от их общего количества. При этом установленная продолжительность наблюдений составляет 2427 мото-ч. Исключив из таблицы 2 все повторные замены на машинах № 111, 86, 144, а также согласно данным таблицы 1 — замена кольца на машине № 128, получаем итоговую выборку замен 387, 616, 740, 961. Итак, в нашем случае $N = 12$, $m = 4$. При статистической обработке полученного ряда сделан вывод о нормальном законе распределения. Промежуточные вычисления сведены в таблице 3. Далее определены значения коэффициента ϕ :

$$\phi = \frac{\sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_i}{T - \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot t_i} = \frac{624}{2427 - 1252} = 0.531.$$

Коэффициент μ , соответствующий вычисленному значению ϕ , равен 0.0056 [9, 15].

Средний ресурс соединительного пальца равен:

$$T_{cp} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot t_i - \mu \cdot \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot t_i = 1252 - 0.0056 \cdot 624 = 1249 \text{ мото-ч.}$$

Таблица 1. Нарботка машин до списания

Номер машины	Нарботка, мото-ч.	Включена в выборку (+). Исключена (-)	Номер машины	Нарботка, мото-ч.	Включена в выборку (+). Исключена (-)
155	1212	–	69	2520	+
128	1848	–	111	2537	+
70	1929	–	265	2748	+
78	2007	–	144	2765*	+
355	2087	–	112	2873	+
152	2155*	–	105	2897	+
86	2427*	+	114	3023	+
356	2481	+	113	3049	+
129	2499	+	256	3330	+

* Машины находятся под наблюдением.

Таблица 2. Нарботка машин на момент замены пальца

Номер машины	Нарботка, мото-ч.	Включена в выборку (+). Исключена (-)
111	387	+
86	615	+
69	740	+
86	849	-
86	905	-
144	961	+
86	1206	-
128	1573	-
86	1582	-
111	2297	-
144	2657	-
144	2494	-
111	2495	-

Таблица 3. Результаты вычислений

t_i	α_i	β_i	$\alpha_i \cdot t_i$	$\beta_i \cdot t_i$
387	-0.4059	-0.6836	-157.0833	-264.5532
615	-0.1472	-0.3493	-90.5280	-214.8195
740	-0.0321	-0.1096	-23.7540	-81.1040
961	1.5852	1.2324	1523.3772	1184.3364

4. Выводы и заключение

1. Обоснованы и апробированы методические положения по оценке среднего ресурса и расчету расхода запасных частей по результатам незавершённых испытаний по планам [NUT] и [NUT].
2. Методические положения по проведению расчётов могут быть использованы для других машин, в том числе и зарубежного производства.
3. Дальнейшее развитие приведённой методики заключается в расширении номенклатуры деталей и узлов, для обоснования объёмов их производства и поставки в качестве запасных частей.

Список литературы

1. ГОСТ Р 27.403-2009 «Надёжность в технике. Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы».
2. ГОСТ 27.402-95 «Надёжность в технике. Планы испытаний для контроля средней наработки до отказа (на отказ)».
3. РД 50-690-89 «Методические указания. Надёжность в технике. Методы оценки показателей надёжности по экспериментальным данным».
4. ГОСТ 25044-81 «Техническая диагностика. Диагностирование автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных, строительных и дорожных машин. Основные положения».
5. РД 13-23-56-88 «Руководящий нормативный материал. Номенклатура показателей и обоснование норм надёжности лесозаготовительных машин и оборудования». — Москва : ЦНИИМЭ, 1988. — 46 с.
6. *Кельберт, М. Я.* Вероятность и статистика в примерах и задачах. — Т. 1. Основные понятия теории вероятностей и математической статистики / М. Я. Кельберт, Ю. М. Сухов. — Москва : МЦНМО, 2010.— 488 с.
7. *Shilovsky, V. N.* Prospects for the development of imported forest machines maintenance in the Russian Federation In Proceedings of the XXIII International Scientific Technical Conference trans & MOTAUTO'15 / V. N. Shilovsky, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich. — Varna, Bulgaria, 2015. Vol. 3. — P. 53—56.
8. *Питухин, А. В.* Надёжность лесозаготовительных машин и оборудования : учеб. пособие / А. В. Питухин, В. Н. Шиловский, В. М. Костюкевич. — Санкт-Петербург : Лань, 2010. — 288 с.
9. *Попов, Ф. П.* Обеспечение лесозаготовительной техники запасными частями / Ф. П. Попов. — Москва : Экология, 1991. — 144 с.
10. *Шиловский, В. Н.* Теоретические основы и стратегии организации маркетинга и менеджмента технического сервиса территориально распределённых машин и оборудования : [монография] / В. Н. Шиловский. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2001. — 324 с.
11. *Шиловский, В. Н.* Маркетинг и менеджмент технического сервиса машин и оборудования / В. Н. Шиловский, А. В. Питухин, В. М. Костюкевич. — Санкт-Петербург : Лань, 2015. — 278 с.

References

1. GOST R 27.403-2009 «Nadezhnost' v tekhnike. Plany ispytaniy dlya kontrolya veroyatnosti bezotkaznoy raboty».
2. GOST 27.402-95 «Nadezhnost' v tekhnike. Plany ispytaniy dlya kontrolya sredney narabotki do otkaza (na otkaz)».
3. RD 50-690-89 «Metodicheskiye ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody otsenki pokazateley nadezhnosti po eksperimental'nyim dannym».
4. GOST 25044-81 «Tekhnicheskaya diagnostika. Diagnostirovaniye avtomobiley, traktorov, sel'skokhozyaystvennykh, stroitel'nykh i dorozhnykh mashin. Osnovnyye polozheniya».

5. RD 13-23-56-88 «Rukovodyashchiy normativnyy material. Nomenklatura pokazateley i obosnovaniye norm nadezhnosti lesozagotovitel'nykh mashin i oborudovaniya». — Moskva : TSNIIME, 1988. — 46 s.
6. *Kel'bert, M. YA.* Veroyatnost' i statistika v primerakh i zadachakh. — Tom 1. Osnovnyye ponyatiya teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki / M. YA. Kel'bert, YU. M. Sukhov. — Moskva : MTSNMO, 2010. — 488 s.
7. *Shilovskiy, V. N.* Prospects for the development of imported forest machines maintenance in the Russian Federation In Proceedings of the XXIII International Scientific Technical Conference trans & MOTAUTO'15 / V. N. Shilovskiy A. V. Pitukhin V. M. Kostyukevich. — Varna, Bulgaria, 2015. — Vol. 3. — P. 53—56.
8. *Pitukhin, A. V.* Nadezhnost' lesozagotovitel'nykh mashin i oborudovaniya : ucheb. Posobiye / A. V. Pitukhin, V. N. Shilovskiy, V. M. Kostyukevich. — Sankt-Peterburg Lan', 2010. — 288 s.
9. *Popov, F. P.* Obespecheniye lesozagotovitel'noy tekhniki zapasnymi chastyami / F. P. Popov. — Moskva : Ekologiya, 1991. — 144 s.
- 10 *Shilovskiy, V. N.* Teoreticheskiye osnovy i strategii organizatsii marketinga i menedzhmenta tekhnicheskogo servisa territorial'no raspredelennykh mashin i oborudovaniya : [monografiya] / V. N. Shilovskiy. — Petrozavodsk : Isd-vo PetrGU, 2001. — 324 s.
11. *Shilovskiy, V. N.* Marketing i menedzhment tekhnicheskogo servisa mashin i oborudovaniya / V. N. Shilovskiy, A. V. Pitukhin, V. M. Kostyukevich. — Sankt-Peterburg : Lan', 2015. — 278 s.