

УДК 630.3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ МАШИН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НЕЗАВЕРШЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Шиловский В.Н., Питухин А.В., Костюкевич В.М., Гольштейн Г.Ю.

Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), Петрозаводск, e-mail: grigory@psu.karelia.ru

В статье рассматривается проблема оценки надежности новых модификаций лесных машин в сжатые сроки. Данная задача решается за счет использования методов определения показателей надежности машин по результатам незавершенных испытаний. При этом используются данные о закономерности изменения надежности в зависимости от величины наработки аналогов и прототипов совершенствуемой лесозаготовительной техники. В результате обработки экспериментальных данных испытаний трелевочных тракторов Онежского тракторного завода получены регрессионные зависимости, отражающие связь между наработкой на отказ и величиной суммарной наработки в условиях рядовой эксплуатации. Порядок определения нормируемого уравнения за определенную наработку рассмотрен на примере трелевочных тракторов Онежского тракторного завода, которые могут быть использованы при оценке надежности более прогрессивных моделей машин, разработанных на базе исследованных аналогов и прототипов. Получены уравнения связи между количеством отказов и общей суммарной наработкой по основным системам машин и группам сложности их отказов. Имея нормируемые уравнения связи между количеством отказов и наработкой можно определять плановые (нормативные) показатели безотказности и сравнивать с фактическими за любую наработку, меньшую зафиксированной в Карте Уровня на машину. Это позволяет на ранней стадии эксплуатации или испытаний оценить уровень безотказности данной конкретной партии выпущенных заводом лесных машин, сравнить с плановым и, в случае необходимости, наметить мероприятия по ее повышению.

Ключевые слова: прогнозирование показателей надежности, число отказов, наработка на отказ лесной машины, незавершенные испытания

RELIABILITY PREDICTION FOR MACHINES BASED ON THE RESULTS OF THE INCOMPLETE TESTS

Shilovski V.N., Pitukhin A.V., Kostyukevich V.M., Golshtein G.Y.

PETROZAVODSK STATE UNIVERSITY (PetrSU), Petrozavodsk, e-mail: grigory@psu.karelia.ru

The article considers the problem of reliability evaluation of new modifications of forestry machines on a tight schedule. This problem can be solved by using test methods for estimating reliability index based on the results of the incomplete tests. For this we use the data of the regularity of changes in reliability depending on the operating time of analogs and prototypes of the modified forestry machinery. Based on the experimental data of the tests carried out on a skidding tractor produced by the Onega Tractor Plant we derived a regressive dependence reflecting the connection between mean time between failures and total operating time in normal operating conditions. The procedure of defining specified equation for specific operating time is considered using skidding tractors produced by the Onega Tractor Plant that can be used in reliability evaluation of more advanced models of machinery based on examined analogs and prototypes. The equation of connection between the number of failures and total operating time was obtained for the main machine systems and the degrees of complexity of their failures. With specified equations of connection between the number of failures and operating time it is possible to determine the planned (standard) reliability index and compare it with actual value for any amount of operating time that is less than the one stated in the Level Chart of the machine. It enables at an early stage of operating or testing to evaluate reliability index of a specific batch of forestry machines, compare it with the planned value and if needed schedule activities for its improvement.

Keywords: reliability prediction, number of failures, mean time between failures of a forestry machine, incomplete tests

В условиях ускоренной обновляемости модификаций машин возникает потребность в определении и прогнозировании показателей их надежности в наиболее сжатые сроки. Прежде всего, это относится к оценке показателей долговечности и таких показателей безотказности, как наработка машины на отказ.

Эта потребность оценки надежности машины за ограниченный промежуток времени, как правило, бывает вызвана необходимостью иметь сравнительные оценки различных конструкций машин, например, при запуске машины в серийное производство, контроле текущего качества, когда получение информации путем ресурсных испытаний в условиях эксплуатации затягивается на несколько лет [2, 4].

Данную проблему можно решать как путем внедрения ускоренных испытаний, так и внедрением методов определения показателей надежности машин по результатам сокращенных испытаний [5–7].

Результаты того и другого метода должны дополнять и другие источники информации по прогнозированию надежности машин, в частности, данные о закономерности изменения надежности в зависимости от величины наработки аналогов и прототипов совершенствуемой лесозаготовительной техники.

Рассмотрим этот вопрос на примере трелевочных тракторов Онежского тракторного завода (ОТЗ). Кафедрой транспортных и технологических машин и оборудования

ПетрГУ совместно с КарНИИЛПОм были собраны и обработаны данные испытаний нескольких партий машин различных годов выпуска, отличающихся конструктивными усовершенствованиями, вносимыми с целью устранения выявленных в ходе эксплуатации недостатков [1, 6, 8].

В результате многолетних исследований были получены уравнения связи количества отказов от наработки машин разных годов выпуска, испытываемых за наработку в пределах 2400 – 3600 моточасов. В качестве примера могут быть рассмотрены результаты испытаний отдельных партий тракторов, в последующем объединенных в одну совокупность, представляющие итог исследований пяти партий машин различных годов выпуска.

В одной из партий под наблюдение были поставлены семь трелевочных тракторов с манипулятором модели ТБ-1М, производства Онежского тракторного завода. Статистическая обработка данных проводилась через каждые 300 моточасов наблюдений за наработку 2400 моточасов. В табл. 1 представлены результаты обработки данных по количеству отказов, трудоемкости устранения отказов и времени устранения отказов. Получены следующие

статистические характеристики: медиана M_e , среднее арифметическое значение M , среднее квадратическое отклонение σ , ошибка среднего арифметического m , коэффициент вариации v , показатель точности p , вероятность P . Результаты представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты итоговой обработки данных испытываемой в условиях рядовой эксплуатации отдельной партии тракторов.

Получены уравнения регрессии, отражающие связь между числом отказов машины и величиной наработки за 3600 моточасов наблюдений, в том числе зависимости числа отказов от наработки как для трактора в целом, так и для его основных систем и групп сложности отказов. Уравнения, отражающие зависимость числа отказов от наработки, определялись с использованием пакета прикладных программ Statgraph.

В табл. 3 приведены регрессионные зависимости наработки на отказ в зависимости от суммарной наработки тракторов, полученные путем совмещения уравнений, полученных для отдельных пяти партий машин разных лет выпуска, подобно партии, приведенной в табл. 2.

Таблица 1

Статистические характеристики результатов наблюдений

| Параметр | M_e | M | σ | m | v | p | P |
|---|-------|-------|----------|------|-------|-------|-------|
| Количество отказов | 68,0 | 66,3 | 11,0 | 4,1 | 0,166 | 0,062 | 0,683 |
| Трудоемкость устранения отказа, чел.-ч. | 241,4 | 254,3 | 61,3 | 23,2 | 0,241 | 0,091 | 0,683 |
| Время устранения отказа, ч. | 167,3 | 173,5 | 43,4 | 16,4 | 0,250 | 0,095 | 0,683 |

Таблица 2

Уравнения связи между числом отказов и общей суммарной наработкой одной из исследуемых партий тракторов ТБ-1М

| Трактор, система, группа сложности отказов | Вид уравнения | Коэффициент множественной корреляции (r) | F-критерий | Вероятность ошибки уравнения | T-критерий | Вероятность ошибки коэффициентов |
|--|---|--|------------|------------------------------|------------|----------------------------------|
| Трактор в целом | $y = 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot t$ | 0,9997 | 7192,7 | 0,008 | 4,27 | 0,001 |
| В том числе по группам сложных отказов | | | | | | |
| II гр. | $y = 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 5,6 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9994 | 3178,2 | 0,000 | 11,95 | 0,000 |
| III гр. | $y = 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9968 | 614,3 | 0,000 | 5,07 | 0,000 |
| В том числе по основным системам | | | | | | |
| Двигатель | $y = 0,33 \cdot 10^{-2} \cdot t$ | 0,9988 | 3676,8 | 0,000 | 60,64 | 0,000 |
| Трансмиссия | $y = 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 6,4 \cdot 10^{-4} \cdot t$ | 0,9973 | 746,1 | 0,000 | 7,32 | 0,000 |
| Технологическое оборудование | $y = 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9996 | 2018,0 | 0,000 | 9,57 | 0,000 |

Таблица 3

Итоговые (совмещенные) уравнения связи между числом отказов и общей суммарной наработкой тракторов ТБ-1М разных партий и лет выпуска

| Трактор, система, группа сложности отказов | Вид уравнения | Коэффициент множественной корреляции (r) | F-критерий | Вероятность ошибки уравнения | T-критерий | Вероятность ошибки коэффициентов |
|--|---|--|------------|------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| Трактор в целом | $y = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot t$ | 0,9863 | 678,62 | 0,000 | 3,717 12,144 | 0,001 0,000 |
| В том числе по группам сложных отказов | | | | | | |
| II гр. | $y = 1,68 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 5,88 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9986 | 6548,64 | 0,000 | 17,13 32,37 | 0,000 0,000 |
| III гр. | $y = 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,46 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9821 | 516,2 | 0,000 | 6,48 7,447 | 0,000 0,000 |
| В том числе по основным системам | | | | | | |
| Двигатель | $y = 0,7 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9767 | 393,53 | 0,000 | 2,680 9,390 | 0,011 0,000 |
| Трансмиссия | $y = 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9804 | 471,66 | 0,000 | 6,05 7,26 | 0,000 0,000 |
| Технологическое оборудование | $y = 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2,54 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | 0,9946 | 1730,75 | 0,000 | 6,82 18,55 | 0,000 0,0 |

Путем совмещения выявленных зависимостей, характерных для пяти различных партий одноименных машин разных лет выпуска, получены достоверные зависимости показателей безотказности от суммарной наработки как для чокерных (ТДТ-55А), так и бесчокерных (ТБ-1М) тракторов Онежского тракторного завода.

Контрольные (нормативные или плановые) показатели надежности для лесозаготовительных машин назначаются за определенную наработку, в частности, равную трем тысячам моточасов. Рассмотрим порядок определения нормируемого уравнения связи между возрастающей наработкой и условно нормативным числом отказов машины на примере трактора ТБ-1М, которое может быть использовано при оценке надежности более прогрессивных моделей машин, разработанных на базе исследованных аналогов и прототипов, таких как ТБ-1М15 [3].

Итоговое (обобщающее) уравнение, отражающее связь числа отказов трактора ТБ-1М (y) в зависимости от общей его наработки (t) выражается следующим уравнением (табл. 3):

$$y = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot t.$$

Уравнение представляет собой полное квадратное уравнение со свободным членом равным нулю и двумя степенями свободы, что позволяет в нормируемом уравнении оставить без изменения второй, более значимый коэффициент ($b = 1,785$), вероятность ошибки которого равна нулю. Определим величину первого, менее значимого коэффициента, нормируемого уравнения. При условии, что нормативное, предусмо-

тренное Техническими Условиями (ТУ), число отказов для трактора ТБ-1М за наработку 3000 часов по мотосчетчику составляет 80,7, искомый коэффициент (a) определится из следующего уравнения:

$$a \cdot 10^{-6} \cdot 3000^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot 3000 = 80,7.$$

Согласно представленному уравнению коэффициент $a = 3,02$.

Нормируемое уравнение в целом для трактора ТБ-1М будет иметь вид:

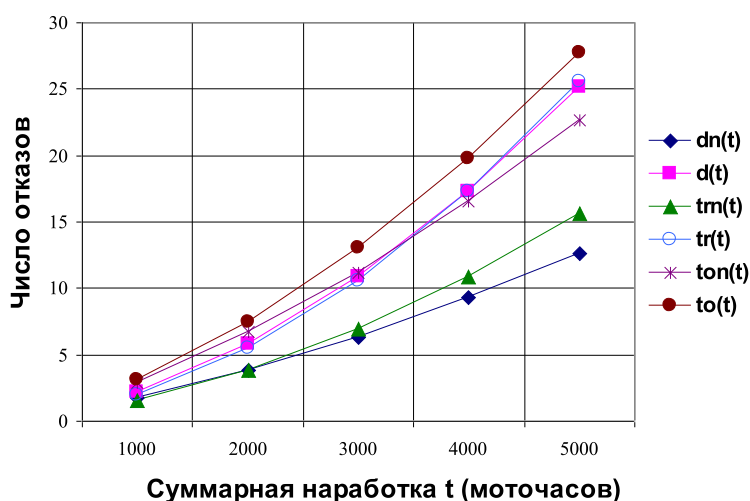
$$y = 3,02 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot t.$$

Уравнение справедливо в пределах наработки до 4,5 тысяч моточасов и определяет (нормирует) плановое число отказов в зависимости от наработки трактора. Нормируемые уравнения связи по основным системам и группам сложности представлены в табл. 4, графическая зависимость числа отказов от наработки – на рисунке.

Таблица 4

Нормируемые уравнения связи между количеством отказов и общей суммарной наработкой трактора ТБ-1М

| | |
|--|--|
| В целом по трактору | $y = 3,02 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot t$ |
| В том числе по группам сложных отказов | |
| II гр. | $y = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 5,88 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| III гр. | $y = 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,46 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| В том числе по основным системам | |
| Двигатель | $y = 0,2 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,52 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| Трансмиссия | $y = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,12 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |
| Технологическое оборудование | $y = 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 2,54 \cdot 10^{-3} \cdot t$ |



Фактические и нормируемые уравнения связи между суммарной наработкой t и числом отказов для двигателя ($d(t)$ и $dn(t)$), трансмиссии ($tr(t)$ и $trn(t)$), технологического оборудования ($to(t)$ и $ton(t)$) трактора ТБ-1М

Таблица 5

Уравнения связи числа отказов и наработки

| Наименование и марка машины-аналога (прототипа) | Установленное уравнение связи Нормируемое уравнение связи | Применение для современных машин |
|---|---|----------------------------------|
| Трелевочный трактор ТБ-1М | $y = 3,6 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot t$ $y = 3,02 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 1,785 \cdot 10^{-2} \cdot t$ | ТБ-1М15 |
| Трелевочный трактор ТДТ-55А | $y = 2,3 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot t$ $y = 1,28 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot t$ | ТЛТ-100 |

Определенные подобным образом нормируемые уравнения для тракторов ТДТ-55А могут быть использованы для оценки безотказности современных тракторов ТЛТ-100. При исследовании надежности серийных и опытных машин важно выяснить, насколько число отказов или наработка на отказ, достигнутая, например, за первые сотни и тысячи моточасов, соответствует плановой (нормативной). С помощью нормированных уравнений можно определить условно-нормативную наработку на отказ за любой период испытания машины, исходя из ее предусмотренной нормативно-технической документацией безотказности за конкретную общую наработку.

Достоверные уравнения связи между величинами показателей надежности и накопленной наработкой конкретных марок машин, а также их аналогов и прототипов могут использоваться при контроле и прогнозировании надежности серийных и перспективных модификаций по данным результатов их испытаний даже за небольшую наработку, например, 1,0...1,5 тысячи моточасов.

Уравнения, отражающие зависимость фактической и нормативной безотказности (числа отказов y от общей наработки машин t) таких лесозаготовительных машин, как ТДТ-55А, ТБ-1М, приведены в табл. 5.

Результаты подобных исследований могут и должны дополнять результаты прогнозирования надежности испытаний на надежность любых машин, в данном случае серийных тракторов ТЛТ-100, ТБ-1М15, а также экспериментальных и опытных машин ОТЗ. При мониторинге, наблюдениях за надежностью серийно выпускаемых машин возникает необходимость сравнивать величины фактических показателей безотказности машин с плановыми. Плановые показатели назначаются за определенную фиксированную наработку, например 3000 моточасов, или за ресурс. Имея нормируемые уравнения связи между количеством отказов и наработкой можно определять и сравнивать с фактическими плановые (нормативные) показатели безотказности за любую наработку, меньшую зафиксированной в ТУ на машину. Это по-

зволяет на ранней стадии эксплуатации или испытаний оценить уровень безотказности данной конкретной партии выпущенных заводом машин, сравнить с плановым и наметить мероприятия по ее повышению.

Заключение

1. Для контроля уровня надежности лесозаготовительной машины необходима нормативная (плановая) величина числа отказов или наработки на отказ, предусмотренная в ее ТУ за ресурс или контрольную наработку и достоверные зависимости фактического числа отказов от наработки машины и ее основных систем.

2. Для объективной и своевременной оценки надежности современных тракторов ООО ОТЗ типа ТЛТ-100, ТБ-1М15 могут быть применимы зависимости числа отказов от наработки их аналогов (прототипов) – тракторов ТДТ-55А и ТБ-1М, представленные в данной статье.

Список литературы

1. Питухин А.В. Дерево целей и задач повышения эксплуатационной эффективности машин и оборудования лесного комплекса. / А.В. Питухин, В.Н. Шиловский, С.А. Кильпеляйнен, В.М. Костюкевич, В.А. Кяльвияйнен. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2010. – № 193. – С. 195–202.
2. Питухин А.В. Надежность лесозаготовительных машин и оборудования: учеб. пособие / А.В. Питухин, В.Н. Шиловский, В.М. Костюкевич. – СПб: Изд-во «Лань» 2010. – 288 с.
3. Повышение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин: монография. / А.В. Питухин, В.Н. Шиловский, И.Г. Скобцов, В.А. Кяльвияйнен – Петрозаводск: Петропресс, 2012. – 240 с.
4. Саливоник А. В. Повышение эффективности лесозаготовительных машин путем оптимального резервирования запасных частей и материалов: (на примере машин компании «John Deere»): монография / А.В. Саливоник, А.В. Питухин, В.Н. Шиловский. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. – 80 с.
5. Сравнительная оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин: монография. / В.Н. Шиловский, А.В. Питухин, В.А. Кяльвияйнен, В.М. Костюкевич. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. – 96 с.
6. Шиловский В.Н. Маркетинг и менеджмент технического сервиса машин и оборудования: учебное пособие. / В.Н. Шиловский, А.В. Питухин, В.М. Костюкевич – СПб.: Изд-во «Лань», 2015. – 272 с.
7. Шиловский В.Н. Обеспечение эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин / В.Н. Шиловский, А.В. Питухин, В.А. Кяльвияйнен, В.М. Костюкевич // Ученые записки ПетрГУ. Изд-во ПетрГУ, 2014 – № 6 (143). – С. 84–88.

8. Шиловский В.Н. Оценка эксплуатационной технологичности лесозаготовительных машин. / В.Н. Шиловский, В.А. Кяльвияйнен. // Известия вузов. Лесной журнал, 2013. – № 4. – С. 47–53.

References

1. Pitukhin A.V., Shilovskiy V.N., Kilpelyanen S.A., Kostyukevich V.M., Kyalviyaynen V.A. *Derevo tseley i zadach povysheniya ekspluatatsionnoy effektivnosti mashin i oborudovaniya lesnogo kompleksa* [Aims and tasks tree increasing maintainability the efficiency machines and equipment of timber complex]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhniceskoj akademii*, 2010. no. 193. pp. 195–202.
2. Pitukhin A.V., Shilovskiy V.N., Kostyukevich V.M. *Nadezhnost lesozagotovitelnykh mashin i oborudovaniya* [Reliability of logging machines and equipment]. SPb: Lan Publ., 2010. 288 p.
3. Pitukhin A.V. Shilovskiy V.N., Skobtsov I.G., Kyalviyaynen V.A. *Povyshenie ekspluatatsionnoy tekhnologichnosti lesozagotovitelnykh mashin* [Increasing maintainability of forest machines]. Petrozavodsk, Petroppress, 2012. 240 p.
4. Salivonik A.V., Pitukhin A.V., Shilovskiy V.N. *Povyshenie effektivnosti lesozagotovitelnykh mashin putem optimalnogo rezervirovaniya zapasnykh chastei i materialov* [Improving the efficiency of logging machines by optimal reservation of spare parts and materials]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2014. 80 p.
5. Shilovskiy V.N., Pitukhin A.V., Kyalviyaynen V.A., Kostyukevich V.M. *Sravnitel'naya otsenka ekspluatatsionnoy tekhnologichnosti lesozagotovitelnykh mashin* [Comparative evaluation of forest machines maintainability]. Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2014. 96 p.
6. Shilovskiy V.N., Pitukhin A.V., Kostyukevich V.M. *Marketing i menedzhment tekhnicheskogo servisa mashin i oborudovaniya* [Marketing and management of technical service of machinery and equipment]. SPb: Lan Publ., 2015. 272 p.
7. Shilovskiy V.N., Pitukhin A.V., Kyalviyaynen V.A., Kostyukevich V.M. *Ensuring of forest machines maintainability. [Obespechenie ekspluatatsionnoy tekhnologichnosti lesnykh mashin] Uchyenye zapiski Petrozavodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Series: «Natural and engineering sciences»]. 2014. no. 6(143). pp. 84–88.
8. Shilovskiy V.N., Kyalviyaynen V.A. *Otsenka ekspluatatsionnoy tekhnologichnosti lesozagotovitelnykh mashin* [evaluation of forest machines maintainability]. *Proceedings of the universities. Forest journal*. 2013. no. 4. pp. 47–53.

Рецензенты:

Сюнев В.С., д.т.н., профессор, проректор по научно-исследовательской работе Петрозаводского государственного университета, ФГБОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет» (ПетрГУ), г. Петрозаводск;

Шегельман И.Р., д.т.н., профессор, президент Карельской инженерной академии, Карельская инженерная академия, г. Петрозаводск.

Работа поступила в редакцию 15.04.2015.