

УДК 630.2 + 630.3

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СЕРВИСА ЛЕСНОЙ ОТРАСЛИ

Питухин А.В., Серебрянский Н.И., Эгипти А.Э., Скобцов И.Г.

ГОУ ВПО «Петрозаводский государственный университет»,  
Петрозаводск, e-mail: iskobtsov@mail.ru

В организации технического обслуживания и ремонта техники имеется неравномерный поток заявок. На основе этого положения при проектировании предприятий технического сервиса могут быть применены законы системы массового обслуживания. Как правило, на производстве одновременно могут эксплуатироваться объекты с различной наработкой и, следовательно, с различной вероятностью отказа. Для оценки технического состояния таких объектов предлагается определять количество отказов на интервале наработки с помощью средневзвешенной вероятности отказа парка эксплуатируемых машин за определенный период времени. Средневзвешенная вероятность отказа представляет собой вероятность отказа парка машин как единой системы и численно равна отношению количества отказов на интервале всей системы машин. Для расчетов принятый период эксплуатации парка машин был разделен на равные интервалы и принималось допущение о том, что на интервале замены не производится, все отказавшие объекты подлежат замене в конце интервала и составляют группу машин с одинаковой наработкой.

**Ключевые слова:** предприятие технического сервиса, система массового обслуживания, нормальный закон распределения, средневзвешенная вероятность отказа системы машин

## THE ORETICAL FOUNDATIONS PROJECTION MAINTENANCE ENTERPRISES IN THE FOREST SECTOR

Pitukhin A.V., Serebrianskiy N.I., Egypti A.E., Skobtsov I.G.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, e-mail: iskobtsov@mail.ru

There are irregular flow of applications in the organization of technical maintenance and repair of equipment. On the basis of this provision the laws of mass service system can be applied in design of technical services. As a rule, machines with the different operating time and, as a result, with the different failure probability can be exploit at the plants. The evaluation of the object's technical state can be determined by number of their failures at the interval of operating time. It is offered to use a weighted average probability of failures of park machines for a certain period of time. Weighted average probability of failures is a failure probability of park cars as a whole system and can be evaluate as relative amount of system machine failures. For calculations, the period of car park exploitation was divided into the equal intervals and it was assumed that there is no replacements within the interval, whole failure objects must be replaced at the end of this interval and forms machine group with the equal operating time.

**Keywords:** maintenance enterprises, queuing system, the normal distribution law, average failure probability system machines

В условиях рыночной экономики автотракторная техника эксплуатируется на предприятиях различных форм собственности и типоразмеров, в которых ремонтные работы не подвергаются плановой регламентации. Работоспособное состояние техники поддерживается устранением возникших в процессе эксплуатации неисправностей в форме текущего ремонта, включая замену отработавших ресурс деталей, узлов, агрегатов. Ремонтные работы выполняются или силами предприятия, эксплуатирующего технику, или на специализированных предприятиях технического сервиса (ПТС).

При существующей организации технического обслуживания и ремонта техники на ПТС поступает неравномерный поток заявок на обслуживание машин. В потоке заявок имеют место временные сгущения и разрежения. Сгущения могут привести к образованию очереди или к отказу выполнения заявок. Разрежения приводят к непроизводительному простоя отдельных

постов или зоны в целом и, как следствие, к финансовым убыткам. ПТС машин приобретают вероятностный характер функционирования, типичный для систем массового обслуживания (СМО).

Любая СМО характеризуется двумя встречными потоками: потоком заявок и потоком обслуживания. Данные потоки имеют свои параметры. Введем обозначения:  $\lambda$  – параметр потока заявок,  $\mu$  – параметр потока обслуживания. Для определения объема работ, выполняемых на проектируемом ПТС, и его пропускной способности необходимо иметь значения параметров  $\lambda$  и  $\mu$ . Параметр потока заявок определяется количеством носителей заявок, то есть числом обслуживаемых объектов и их техническим состоянием, зависящим от наработки. В простейшем случае для выполнения предварительных расчетов можно принять, что число носителей заявок по времени не меняется. Отработавшие ресурс машины или их элементы заменяются на новые или отремонтированные с ресурсом новых.

Качественно ситуация складывается так, что в любой момент времени одновременно эксплуатируются объекты с различной наработкой, следовательно, с различной вероятностью отказа. Для оценки технического состояния такого парка объектов и определения количества отказов на интервале наработки предлагается использовать средневзвешенную вероятность отказа (СВО) парка эксплуатируемых машин на интервале наработки. По сути СВО представляет собой вероятность отказа парка машин, как единой системы и численно равна относительному количеству отказов на интервале всей системы машин. Для вывода формулы расчета СВО принятый период эксплуатации парка машин разделим на равные интервалы  $R$  и примем допущение, что на интервале замены не производятся, все отказавшие на интервале объекты подлежат замене в конце его и составляют группу машин с одинаковой наработкой и относительным количеством  $q_n$ , равным числу замен на интервале. При этом значение СВО парка эксплуатируемых объектов складывается из суммы произведений относительного количества объектов на интервале с одинаковой наработкой, умноженного на вероятность отказа единичного объекта при данной наработке  $F(L)$ , где  $F(L)$  есть функция распределения наработки до первого отказа исследуемых объектов при эксплуатации без замен. Определим искомую сумму следующим образом. На первом

интервале работают только незаменяемые объекты. В конце интервала вероятность отказа их равна  $F_1$ , можно записать  $q_1 = F_1$ .

На втором интервале работают следующие объекты:

1) заменяемые в конце первого интервала. Относительное количество их  $q_1$  и вероятность отказа  $F_1$ . Доля их в СВО системы машин составляет  $q_1 \cdot F_1$ ;

2) незаменяемые объекты. Относительное количество их составляет  $(1 - q_1)$  и вероятность отказа единичного объекта  $F_2$ , так как они отработали два первых интервала. Доля их в СВО системы машин составит  $(1 - q_1) \cdot F_2$ . Количество замен в конце второго интервала составляет

$$q_2 = q_1 \cdot F_1 + (1 - q_1) \cdot F_2.$$

На третьем интервале работают следующие объекты:

1) заменяемые в конце первого интервала. Относительное количество их  $q_1$  и вероятность отказа  $F_2$ , так как они отработали два первых интервала. Доля их в искомую СВО составляет  $q_1 \cdot F_2$ ;

2) заменяемые на втором интервале. Относительное количество их и вероятность отказа  $F_1$  (отработали один первый интервал). Доля их в искомую СВО составляет  $q_2 \cdot F_1$ ;

3) незаменяемые объекты. Относительное количество их составляет  $(1 - q_1 - q_2)$  и вероятность отказа  $F_3$ . Их вклад в искомую СВО составляет  $(1 - q_1 - q_2) \cdot F_3$ . Складывая отменные доли СВО, имеем:

$$q_3 = q_1 \cdot F_2 + q_2 \cdot F_1 + (1 - q_1 - q_2) \cdot F_3.$$

По аналогии напишем значение  $q_4$ :

$$q_4 = q_1 \cdot F_3 + q_2 \cdot F_2 + q_3 \cdot F_1 + (1 - q_1 - q_2 - q_3) \cdot F_4.$$

На примере формулы расчета  $q_4$  проведем преобразование ее.

$$q_4 = q_1 \cdot F_3 + q_2 \cdot F_2 + q_3 \cdot F_1 + F_4 - q_1 \cdot F_4 - q_2 \cdot F_4 - q_3 \cdot F_4.$$

или 
$$q_4 = F_4 - (q_1 \cdot F_4 - q_1 \cdot F_3) - (q_2 \cdot F_4 - q_2 \cdot F_2) - (q_3 \cdot F_4 - q_3 \cdot F_1),$$

или 
$$q_4 = F_4 - q_1 \cdot (F_4 - F_3) - q_2 \cdot (F_4 - F_2) - q_3 \cdot (F_4 - F_1).$$

Обобщая, напишем:

$$q_n = F_n - \sum_{i=1}^{n-1} q_i \cdot (F_n - F_{n-i}), \quad (1)$$

где  $F_n$  – вероятность отказа единичного объекта в конце наработки первых  $n$  интервалов.

Физический смысл формулы (1) состоит в следующем. Первое слагаемое  $F_n$  полагает, что все объекты, изначально пущенные в эксплуатацию, отработали  $n$  интервалов (по нашему примеру  $n = 4$ ). Их СВО в таком случае равна  $F_4$ . Заменяемые реально на предыдущих интервалах объекты отработали

меньшее число интервалов, их вероятность отказа по группам  $q_i$  (рис. 1) имеет меньшее значение от  $F_n$  на ординату  $\Delta F_i = F_n - F_{n-i}$ . Значение СВО парка машин уменьшается. В том смысл знака «минус» перед суммой произведений в формуле (1).

Перепишем формулу (1) в виде следующих выражений:

$$q_n = F_n - \sum q_i \cdot F_n + \sum q_i \cdot F_{n-i}; \quad (2)$$

$$q_n = F_n + \sum q_{n-i} \cdot F_i - \sum q_i \cdot F_n. \quad (3)$$

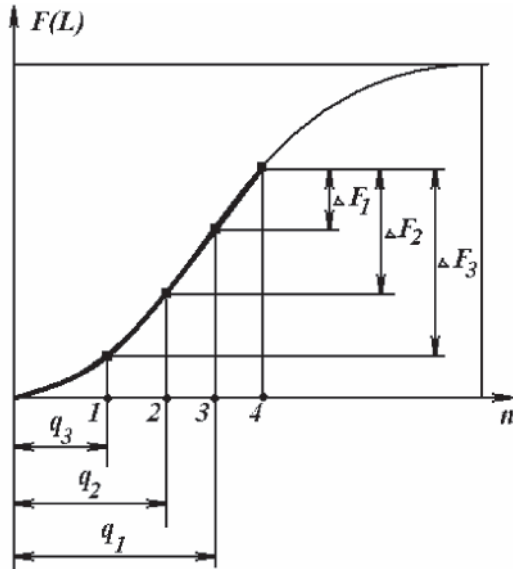


Рис. 1. Фрагмент функции распределения:  
 $q_i$  – наработка объектов группы  $i$ ;  
 $\Delta F(L)$  – ордината уменьшения  $F(L)$

В формулах (2) и (3)  $i$  меняется в пределах от 1 до  $n - 1$ .

Проанализируем более детально физический смысл формулы расчета  $q_n$  в виде выражения (2). Вновь вводимые в эксплуатацию объекты вместо отказавших увеличивают СВО системы машин в целом на сумму произведений  $q_i \cdot F_{n-i}$ . В этом смысл знака «плюс» перед данной суммой. Но так как их наработка меньше, чем не отказавших на интервале, то увеличение СВО системы машин вновь вводимой группой  $q_i$  на интервале  $i$  меньше на ординату  $\Delta F_i$

сравнительно с незаменными объектами. В этом смысл знака «минус» перед суммой произведения  $q_i \cdot F_n$ . Сумма произведений со знаком «минус» всегда имеет большее значение, чем сумма произведений со знаком «плюс». В итоге значение СВО системы машин на интервале всегда меньше предельного  $F_n$ . Этот вывод подтверждается результатом расчета СВО парка машин, который был проведен на компьютере в составленной для решения данной задачи программе. Расчет выполнен по следующим исходным данным: средняя наработка до ресурсного отказа трелевочных тракторов 5120 моточасов; среднее квадратическое отклонение ресурса 2116. Величина интервала 1000 моточасов, количество интервалов 24. Рассчитана СВО парка тракторов на примере распределения наработки до первого отказа по закону Вейбулла и нормальному распределению. По алгоритму программы рассчитывается функция распределения  $F(L)$  обоих законов, плотность распределения  $f(L)$  и по формуле (1) средневзвешенная вероятность отказа системы машин  $q_n$ . Графическое изображение полученных зависимостей дано на рис. 2. СВО парка тракторов стабилизируется и принимает значение 0,18 при распределении Вейбулла и 0,19 при нормальном. Данные значения  $q_n$  можно принять в расчет параметра потока заявок на ПТС по формуле

$$\lambda = \frac{q \cdot N}{R}, \quad (4)$$

где  $N$  – количество эксплуатируемых объектов (носителей заявок).

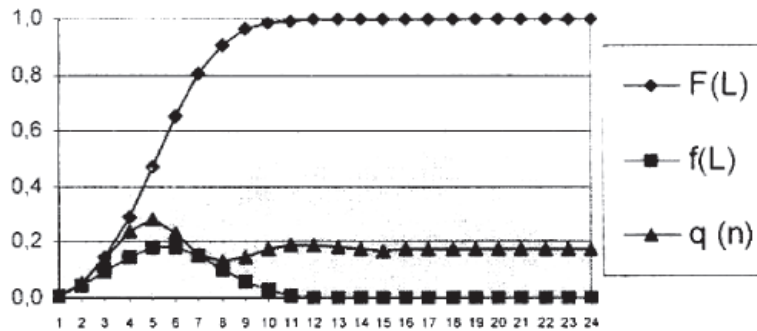


Рис. 2. Расчет средневзвешенной вероятности ресурсного отказа тракторов

Значение СВО парка эксплуатируемых объектов определяется величиной интервала. В таблице приведена зависимость СВО парка машин на периоде эксплуатации 1000 моточасов. Период эксплуатации разбит на интервалы по 100 моточасов. Расчет выполнен по формуле (1) по параметрам, принятым в предыдущем примере. Установившееся значение СВО парка машин пропорционально величине интервала. Данная

зависимость позволяет определить оптимальную периодичность проведения технических воздействий по экономическому критерию. Задача сводится к определению оптимальной вероятности отказа на интервале по соотношению стоимостных затрат на контрольно-регулирующие и ремонтные работы и по формуле (1) переходу к искомой величине интервала. Таким образом, решается обратная задача: по известной СВО

парка машин определяется оптимальная периодичность выполнения регламентных работ. Рассмотрим методику расчета искомых элементов стоимостных затрат. В системе машин одновременно эксплуатируются объекты с различной кинетикой изнашивания их элементов и старения машин в целом. Это определяет необходимость проверки контролируемых параметров всех объектов системы, то есть количество проверок в конце любого рассматриваемого интервала равно числу машин  $N$ . Если принять стоимость выполнения одной проверки  $C_1$ , то затраты на выполнение контрольных операций на интервале равны произведению  $C_1 \cdot N$ . Операции по техническому обслуживанию

и регламентный ремонт выполняются по машинам, контролируемые параметры которых вышли за пределы допустимого значения. Количество таких объектов определяется СВО системы и равно произведению  $q_n \cdot N$ . Выполненные регламентные работы по поддержанию исправности машин устраняют причины аварийного отказа и связанные с этим стоимостные потери. Таким образом, затраты на выполнение проверок можно приравнять к стоимости аварийного ремонта части машин. Именно

$$C_1 \cdot N = C_2 \cdot N \cdot q_n, \quad (5)$$

где  $C_2$  – средняя сумма стоимостных потерь от простоя машин в ремонте.

Вероятность отказа системы машин на интервале

Интервал	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
СВО	0,015	0,03	0,06	0,08	0,09	0,115	0,130	0,150	0,167	0,187

По равенству (5) определим оптимальное значение СВО парка машин на интервале

$$q_n = \frac{C_1}{C_2}. \quad (6)$$

Следует отметить, что формула (6) действительна при условии, если время и стоимостные затраты на выполнение проверки  $C_1$  достаточно малы по сравнению с затратами на устранение аварийного отказа  $C_2$ . Рассмотрим определение оптимальной периодичности проведения технических воздействий по восстанавливаемым объектам на конкретном примере. Примем стоимость выполнения одной проверки  $C_1 = 2000$  руб.; стоимостные потери при аварийном отказе  $C_2 = 20000$  рублей. По соотношению (6)  $q_n = 0,1$ . Обращаемся к таблице и выбираем по  $q_n = 0,1$  оптимальную периодичность проведения технических воздействий, равную 550 моточасам.

Физический смысл отношения (6) состоит в следующем. Чем сложнее аварийные отказы и более крупные при этом стоимостные потери, тем меньшее значение принимает СВО парка машин, тем чаще необходимо выполнять контрольные операции, направленные на устранение причин отказов.

#### Список литературы

1. Питухин А.В. Определение числа постов по ремонту агрегатов машин на предприятиях технического сервиса / А.В. Питухин, В.Н. Шиловский, Н.И. Серебрянский // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. Вып.4. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2003. – С. 92–94.
2. Питухин А.В. Теоретические основы определения технологических параметров ремонтно-обслуживающей базы автопредприятий / А.В. Питухин, Н.И. Серебрянский, В.Н. Шиловский, А.Э. Эгипти // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. Вып. 8. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2010. – С. 114–116.
3. Питухин А.В. Определение технологических параметров предприятий технического сервиса лесной отрасли / А.В. Питухин, Н.И. Серебрянский, В.Н. Шиловский // Труды лесинженерного факультета ПетрГУ. Вып.7. – Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. – С. 93–95.

4. Шиловский В.Н. Обоснование и разработка комплексной системы организации технического сервиса территориально распределенных лесозаготовительных машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб.: СПбЛТА, 2002. – 36 с.

5. Скобцов И.Г., Эгипти А.Э., Серебрянский Н.И. Организация технического сервиса машин в условиях лесопромышленных предприятий / Опыт лесопользования в условиях Северо-Запада РФ и Финноскандии: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 60-летию лесинженерного факультета ПетрГУ. – Петрозаводск, 2011. – С. 44–46.

#### References

1. Pitukhin A.V. The definition of optimal number of servicing posts for machine aggregates repairing at maintenance enterprises / A.V. Pitukhin, V.N. Shilovskiy, N.I. Serebryanskiy // Research Reports of Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University. Vol. 4 Petrozavodsk: Petrozavodsk State University press, 2003. pp. 92–94.
2. Pitukhin A.V. The theoretical basis of definition technological parameters of motor transport maintenance enterprises / A.V. Pitukhin, N.I. Serebryanskiy, V.N. Shilovskiy, A.E. Egypti // Research Reports of Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University. Vol. 8 Petrozavodsk: Petrozavodsk State University press, 2010. pp. 114–116.
3. Pitukhin A.V. Determination of technological parameters of maintenance enterprises in the forest sector / A.V. Pitukhin, N.I. Serebryanskiy, V.N. Shilovskiy // Research Reports of Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University. Vol. 7 Petrozavodsk: Petrozavodsk State University press, 2008. pp. 93–95.
4. Shilovskiy V.N. The basis and elaboration of complex system of territorially distributed forest machines service organization: Author's abstract for the degree of doctor of technical Sciences. S-Pb: St. Petersburg State Forest Technical Academy, 2002. 36 p.
5. Skobtsov I.G., Egypti A.E., Serebryanskiy N.I. The organization of machinery technical service at wood enterprises / Forest Cluster in North-Western Russia, Finland and Sweden: International Scientific and Technical Conference Devoted to the 60-th Anniversary of Forest Engineering Faculty of Petrozavodsk State University. Petrozavodsk, 2011. pp. 44–46.

#### Рецензенты:

Григорьев И.В., д.т.н., профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии им. С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург;

Шегельман И.Р., д.т.н., профессор, директор ООО «Лесные технологии», г. Петрозаводск.

Работа поступила в редакцию 09.04.2012.