

К. т. н. А. Н. ТЫНЫНЬКА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: polalek562@gmail.com

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПО ЧАСТОТЕ ОТКАЗОВ

*Предложена модель для прогнозирования количества запасных частей на основе анализа параметров надежности и частоты отказов электрорадиоизделий технических систем при использовании распределения Рэлея, позволяющая определять необходимое количество запасных частей к моменту ожидаемого отказа или когда надежность системы падает ниже заданного уровня. С ее помощью можно проводить расчеты одиночных комплектов запасных частей, предназначенных для восстановления работоспособности технических систем.*

**Ключевые слова:** надежность, запасные части, метод прогнозирования, распределение Рэлея, уровень отказов.

Сложные технические системы, используемые в различных сферах деятельности, состоят, как правило, из большого количества компонентов и деталей, и по мере усложнения структуры и функций систем все большее значение приобретает обеспечение их надежной и эффективной работы.

### Анализ проблем в области формирования ЗИП

Одним из способов повышения уровня надежности является создание комплектов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) для оперативной замены в отказавшей системе. Важным показателем для потребителя является коэффициент готовности системы, зависящий от возможности быстрой замены отказавшего компонента или узла. Для того чтобы в такой системе на должном уровне поддерживалась работоспособность, требуется эффективное управление этими запасами [1], поэтому комплектование систем запасным имуществом справедливо рассматривается как частная задача теории управления запасами [2]. Ее решение имеет важное значение для обеспечения непрерывности эксплуатации, а в ряде случаев и для достижения требуемой безопасности. При этом большую роль играет непредсказуемость наступления отказа оборудования и деталей. Одним из способов минимизации ее негативных последствий является поддержание такого количества запасных частей, которое бы заведомо гарантировало замену в случае отказа, однако очевидно, что при реализации такого подхода стоимость складских запасов будет неоправданно завышена.

Более экономным способом является определение необходимого количества запасных частей с использованием одной из доступных мо-

делей прогнозирования [3]. Поскольку из-за упомянутой непредсказуемости спрос на запасные части имеет стохастический характер, применение моделей, устанавливающих неизменный объем ЗИП на весь жизненный цикл изделия только в зависимости от количества находящейся в эксплуатации техники, не всегда позволяет получить адекватную оценку [4]. По этой причине более предпочтительны модели, основанные на использовании таких параметров, как надежность запасных частей, сложность и качество обслуживания, продолжительность жизни, интенсивность эксплуатации, расходы на техническое обслуживание и т. д.

Таким образом, важнейшая из проблем этой области — оптимизация уровня запасов. Основным показателем для восстанавливаемых изделий служит ожидаемое количество возможных недостатков компонентов в условиях ограниченного финансирования, также часто минимизируется ожидаемое время простоя.

В этом вопросе особняком стоит задача расчета ЗИП к проектируемой технике, когда низкая точность исходных данных, априори неизвестная интенсивность отказов и восстановлений оправдывают применение простейших методов расчета. Эта точность может быть настолько низкой, что потребуются учет дополнительных затрат на перепроектирование.

Вопросы расчета надежности оборудования с учетом ЗИП и определение его оптимального состава не теряют своей актуальности и постоянно рассматриваются специалистами. Помимо всего прочего, это связано с тем, что большая доля техники, находящейся в эксплуатации, имеет значительную и постоянно возрастающую нагрузку, нередко превышающую паспортный срок

службы. В таком оборудовании идут ускоренные деградиционные процессы, поэтому остается актуальной задача расчета надежности оборудования, оснащенного ЗИП, с учетом старения.

Среди авторов, уделявших внимание вопросам снабжения ЗИП и минимизации затрат, можно выделить Ю. И. Рыжикова, одного из тех, кто разрабатывал теорию запасов [2]. Было немало работ и других представителей теории надежности, например [5].

Ключевым при выборе подхода и метода оптимизации величины запаса является вопрос критериев оптимизации. Они могут быть экономическими (например, минимизация затрат или максимизация прибыли, что должно приводить к тождественным результатам) или надежностными [5–7] (тут можно сформулировать несколько критериев оптимизации), могут комбинироваться методы управления запасами, теории очередей и эффективности технических систем [8]. Но все-таки ЗИП создается для обеспечения надежности, поддержания работоспособности, повышения готовности, поэтому критерии надежности при формировании ЗИП должны быть основными.

В [9] дана модель задачи оптимизации комплекта запасных изделий и приборов с учетом старения элементов. В рассмотренном виде задача определения состава ЗИП относится к категории задач нелинейного программирования и может быть решена только численными методами. Столь же сложно решается задача на основе динамического программирования [10], в то время как существует потребность в менее трудоемких методах. Такой метод можно получить, основываясь на использовании подходящей модели моментов отказов, что и сделано в настоящей работе.

Из-за сложности обслуживаемых изделий и систем надежность обычно рассматривается как количественная мера. Анализируя надежность и частоту отказов системы, можно оценить необходимое количество запасных частей в момент ожидаемого отказа или падения надежности ниже заданного уровня.

В настоящей работе предложена достаточно простая модель для оценки количества запасных частей на основе анализа параметров надежности.

### Прогнозирование количества запасных частей с использованием распределения Рэлея

Производители запасных частей предоставляют только основную информацию о своей продукции. Можно считать известным средний срок службы запасной части (компонента)  $T_{cp}$ , выраженный в часах. Замена компонента в соответствии с потребностью — это стохастический процесс [11]. Важнейшей априорной информацией является теоретическая модель моментов отказа, поскольку в итоге она определяет объем запасных частей.

Поскольку считается, что распределение Рэлея хорошо описывает постепенные отказы из-за старения компонентов, принимаем, что распределение наработки на отказ составных компонентов технической системы подчиняется закону Рэлея. Кроме этого, принимаем также следующие допущения [12]: восстанавливаемая аппаратура состоит из последовательно соединенных с точки зрения надежности невосстанавливаемых элементов; надежность всех элементов одинакова; отказы всех элементов происходят независимо друг от друга.

Плотность вероятности распределения (ПВР) моментов отказов в модели Рэлея устанавливается уравнением

$$f(t) = (t/\sigma^2) \cdot \exp[-0,5(t/\sigma)^2],$$

где  $\sigma$  — параметр распределения Рэлея, определяемый соотношением  $M(t^2) = 2\sigma^2$ ;  $M(t)$  — математическое ожидание случайной величины  $t$ , распределенной по закону Рэлея.

Исходя из этого,  $T_{cp}$  может быть представлено следующим образом:

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} (t/\sigma)^2 \exp[-0,5(t/\sigma)^2] dt.$$

Преобразуем это уравнение, произведя замену  $t^2/(2\sigma^2) = v$ :

$$T_{cp} = \sigma\sqrt{2} \int_0^{\infty} v^{0,5} \exp(-v) dv = \sigma\sqrt{2} \cdot \Gamma(3/2).$$

Гамма-функция (интеграл Эйлера второго рода)  $\Gamma(3/2) = \sqrt{\pi}/2$ , поэтому средняя продолжительность работоспособности компонента составляет  $T_{cp} = \sigma\sqrt{\pi/2}$ .

Исходя из вышеизложенного, ПВР в модели Рэлея можно представить в виде

$$f(t) = \frac{\pi t}{2T_{cp}^2} \exp\left(-\frac{\pi t^2}{4T_{cp}^2}\right).$$

Интегральный закон распределения определим аналогичным образом:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = \int_0^t f(\pi/2T_{cp}^2) \exp(-\pi t^2/(4T_{cp}^2)) dt.$$

Если подставить  $\pi t^2/(4T_{cp}^2) = v$  в это выражение, его можно свести к уравнению вида

$$F(t) = \int_0^v \exp(-v) dv = 1 - \exp(-v).$$

Функция надежности технической системы  $R(t) = 1 - F(t) = \exp(-v)$ .

Наконец, на основе предыдущих уравнений мы можем определить функцию отказа как вероятность того, что исследуемые компоненты откажут за определенный промежуток времени:

$$\gamma = f(t)/R(t) = \pi t/2T_{cp}^2.$$

Суть этой модели в том, что  $T_{\text{ср}}$  считается переменной величиной, подчеркивая стохастический характер процесса. Наблюдая вариации этой случайной величины во временном интервале в окрестности  $dT_{\text{ср}}$ , мы можем определить количество ненадежных компонентов следующим образом:

$$n = \int_0^{\infty} f(t|T_{\text{ср}}) f(T_{\text{ср}}) dT_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} f(t) T_{\text{ср}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{T_{\text{ср}}^2}{2\sigma^2}\right) dT_{\text{ср}}.$$

где  $T_{\text{ср}}$  — случайная величина, распределенная по закону Гаусса с дисперсией  $D(T_{\text{ср}}) = \sigma^2$ .

Заменой  $T_{\text{ср}}^2/(2\sigma^2) = v_1$  предыдущее уравнение сводится к

$$n = f(t) \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\infty} \exp(-v_1) dv = f(t) \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}}.$$

Учитывая, что  $t$  — случайная величина Рэлея с математическим ожиданием  $M(t) = T_{\text{ср}}$  и дисперсией  $D(t) = 2T_{\text{ср}}/\pi$ , среднее число компонентов  $n$ , в которых появятся дефекты за время  $T_{\text{ср}}$ , можно определить как

$$n = T_{\text{ср}} f(t) \sqrt{2} = \frac{\pi t}{T_{\text{ср}} \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{\pi t^2}{4T_{\text{ср}}^2}\right).$$

Кроме того, количество запасных частей, необходимых в инвентаре, может быть определено путем наблюдения за общим временем, когда случайная величина  $t$  ниже  $T_{\text{ср}}$ :

$$w = \frac{F(t)}{n} = \frac{1 - \exp\left[-\pi t^2/(4T_{\text{ср}}^2)\right]}{t\pi/(T_{\text{ср}}\sqrt{2}) \cdot \exp\left[-\pi t^2/(4T_{\text{ср}}^2)\right]}.$$

### Заключение

Использование теоретической плотности вероятности распределения моментов отказов компонентов технической системы является сравнительно простым способом прогнозирования необходимого количества ЗИП. Когда компоненты подвержены постепенным отказам и известен

средний срок службы запасных частей, можно использовать для расчета ПВР в модели Рэлея. Прогнозирование на ее основе выполняет основную свою функцию — предотвращает задержки при техническом обслуживании и минимизирует перегрузку запасными частями. Зная количество запасных частей, которые необходимо хранить в инвентаре, можно далее определить стоимость замены единицы недостающих компонентов.

Модель может служить удобной основой при создании программного обеспечения для прогнозирования количества запасных частей.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Gopalakrishnan P., Banerji A. K. Maintenance and Spare Parts. — India: PHI Learning Pvt. Ltd, 2003.
2. Рыжиков Ю. И. Теория очередей и управление запасами. — СПб.: Питер, 2001.
3. Ben-Daya M, Duffuaa S. O., Raouf A. Maintenance, Modeling and Optimization. — New York: Springer Science&Business Media, 2012.
4. Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. Maintenance for Industrial System. — New York: Springer Science&Media, 2009.
5. Черкесов Г. Н. Проблема ЗИП и задача формирования нового раздела теории надежности восстанавливаемых систем // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Сер. «Информатика. Телекоммуникации, Управление». — 2011. — №6 (138). — С. 136—153.
6. Черкесов Г. Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012.
7. Черкесов Г. Н. О проблеме расчета надежности восстанавливаемых систем при наличии запасных элементов. Ч. 1 // Надежность. — 2010. — №3. — С. 29—39.
8. Рыжиков Ю. И. Планирование восстанавливаемого ЗИПа // Интегрированная логистика. — 2011. — №1. — С. 34—36.
9. Антонов А. В., Пляскин А. В., Татаев Х. Н. К вопросу оптимизации комплекта запасных изделий с учетом частичной выработки их ресурса // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — №1.
10. Лысенко И. В., Птушкин А. И., Соколов Б. В. Методика синтеза комплекта ЗИП на основе динамического программирования // Изв. Вузов. Приборостроение. — 2013. — Т. 56, №3. — С. 16-21.
11. Wang H., Pham H. Reliability and optimal maintenance. Springer series in reliability engineering. — London: Springer, 2006. — P. 295. — <http://dx.doi.org/10.1007/b138077>
12. Кульбак Л. И. Основы расчета обеспечения электронной аппаратуры запасными элементами. — Москва: Сов. Радио, 1970.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.03 2018 г.

О. М. ТИНИНИКА

Україна, Одеський національний політехнічний університет  
E-mail: polalek562@gmail.com

## ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЗАПАСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ЗА ЧАСТОТОЮ ВІДМОВ

Одним із способів підвищення рівня надійності технічних систем є створення комплекту запасних частин, агрегатів, виробів для їх оперативної заміни за виникнення відмов. Для забезпечення функціонування системи на належному рівні необхідне ефективне управління цими резервами, тому придбання запасних частин правомірно розглядається як особлива проблема теорії управління запасами, вирішення якої важливе для забезпечення безперервності експлуатації, а в ряді випадків і для досягнення необхідної безпеки. Непередбачуваність відмови обладнання та деталей має тут велике значення. Одним із способів зменшення рівня передбачуваності є зберігання достатньої кількості запасних частин, що призводить

до збільшення вартості запасів. Більш дешевий спосіб — оцінити необхідний комплект запчастин за допомогою однієї з доступних моделей прогнозування, при цьому перевагу мають ті моделі, що стосуються оцінки необхідної кількості запасних частин на основі таких параметрів, як їх надійність, складність і якість сервісу, тривалість життя, інтенсивність експлуатації, витрати на обслуговування та інші. У даній роботі запропоновано досить просту модель для оцінки кількості запасних частин на основі аналізу параметрів надійності з використанням розподілу Релея. Прогнозування на її основі виконує свою основну функцію — запобігає затримці при технічному обслуговуванні і мінімізує перевантаження запасними частинами. За допомогою одержаної формули можуть проводитися розрахунки поодиноких комплектів запасних частин, призначених для ремонту, профілактичних робіт і налаштування.

**Ключові слова:** надійність, запасні частини, метод прогнозування, розподіл Релея, рівень відмов.

DOI: 10.15222/TKEA2018.2.42

UDC 669.054

A. N. TYNYNKYA

Ukraine, Odessa National Polytechnic University

E-mail: polalek562@gmail.com

## COMPUTATION OF QUANTITY OF SPARE PARTS BY THE FAILURE FREQUENCY

*One way to increase the level of reliability is to create sets of spare parts, units, devices to be efficiently replaced in the failed system. System availability ratio is very important for consumers. It depends on the ability to quickly replace a failed component. In order for this system to support function at the proper level, effective management of these spare parts reserve is required. Therefore, acquisition of spare parts is rightly considered as a particular problem of the theory of inventory management, the solution of which is important for ensuring service continuity of a system and, in a number of cases, for achieving the required safety.*

*The unpredictability of failure of equipment and its parts has a great impact on this problem. One way to reduce the level of unpredictability is to maintain a sufficient number of spare parts, which leads to an increase in the cost of inventory. A cheaper way is to estimate the necessary spare parts using one of the available forecasting models.*

*Because of this unpredictability, the nature of the demand for spare parts is stochastic, thus the models that establish an unchanged quantity of spare parts for the entire life cycle of the product only depending on the number of equipment in operation do not always provide satisfactory estimates. For this reason, it is preferable to use the models dealing with the estimation of the required number of spare parts based on such parameters as reliability of spare parts, complexity and quality of service, life expectancy, intensity of operation, maintenance costs, etc.*

*Based on the analysis of reliability and failure rate of technical systems, the required number of spare parts is estimated in this article at the time of the expected failure or when reliability falls below a predetermined level. With the help of the obtained formula, calculations can be made for single sets of spare parts for repair, maintenance and adjustment.*

**Keywords:** reliability, spare parts, forecasting method, Rayleigh distribution, failure level.

### REFERENCES

1. Gopalakrishnan P., Banerji A. K. *Maintenance and Spare Parts*. India, PHI Learning Pvt. Ltd, 2003, p. 400.
2. Ryzhikov Yu. I. *Teoriya ocheredei i upravlenie zapasami* [The theory of queues and inventory management.] St. Petersburg: Piter, 2001, 384 p. (Rus)
3. Ben-Daya M, Duffuaa SO, Raouf A. *Maintenance, Modeling and Optimization*. New York, Springer Science & Business Media, 2012, p. 474.
4. Manzini R, Regattieri A, Pham H, Ferrari E. *Maintenance for Industrial System*. New York, Springer Science and Media, 2009, p. 463.
5. Cherkesov G. N. [The problem of spare parts and tools, and the task of forming a new section of the theory of reliability of recoverable systems]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU, Ser. «Informatika. Telekommunikatsii, Upravleniye»*, 2011, no 6 (138), pp. 136-153. URL: ntv.spbstu.ru/issue/t6-1.138. 2011.pdf. (Rus)
6. Cherkesov G. N. *Otchenka nadiozhnostisistem s uchotom ZIP* [Evaluation of the reliability of systems with allowance for spare parts]. St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2012, 480 p. (Rus)

7. Cherkesov G. N. [On the problem of calculating the reliability of recoverable systems in the presence of spare parts.] Part 1. *Reliability*, 2010, no 3, pp. 29-39. (Rus)
8. Ryzhikov Yu. I. [Planning of recoverable spare parts]. *Integrated logistics*, 2011, no 1, pp. 34-36. (Rus)
9. Antonov A. V., Plyaskin A. V., Tataev H. N. [On the optimization of a set of spare products, taking into account the partial development of their resource]. *Modern problems of science and education*. 2012, no 1. URL: <http://www.science-education.ru/en/article/view?Id=5547>. (Rus)
10. Lysenko I. V., Ptushkin A. I., Sokolov B. V. [The technique of synthesizing a set of spare parts based on dynamic programming]. *Izv. Vuzov. Priborostrojenie*, 2013, vol. 56, no 3, pp. 16-21. (Rus)
11. Wang H, Pham H. *Reliability and Optimal Maintenance*. Springer Series in Reliability Engineering. London, Springer, 2006, p. 295. <http://dx.doi.org/10.1007/b138077>
12. Kulbak L. I. *Osnovy raschota obespechenia elektronnoi aparatury zapasnymi chastiami* [Fundamentals of calculating the provision of electronic equipment with spare elements]. Moscow, Sov. Radio, 1970, 208 p. (Rus)

### Описание статьи для цитирования:

Тынныка А. Н. Определение количества запасных элементов технических систем по частоте отказов. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2018, № 2, с. 42—45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.42>

### Cite the article as:

Tynnyka A. N. Computation of quantity of spare parts by the failure frequency. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoi Apparature*, 2018, no. 2, pp. 42-45. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2018.2.42>