

А. П. Макаров, В. А. Соловьев

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОЭЛЕМЕНТНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

A. P. Makarov, V. A. Solovyov

OPTIMIZATION OF ELEMENT-BY-ELEMENT RESERVATION OF ELECTRONIC DEVICES

Аннотация. *Актуальность и цели.* Данная статья посвящена отработке методики поэлементного резервирования, которая реализует структурный подход к резервированию, предполагающий включение в схему устройства дополнительных элементов, которые позволяют скомпенсировать отказы отдельно взятых частей устройства. При этом необходимо определить параметры резервирования, как при условии, что масса, габариты, стоимость должны быть не выше допустимого предельного уровня, а надежность при этом максимальной, так и при условии, что надежность должна быть не ниже требуемой, а масса, габариты и стоимость – минимальными. *Материалы и методы.* Был рассмотрен метод расчета оптимизированной резервированной системы по критерию ее сложности. Для данного расчета предполагается использование вероятностных методов расчета надежности. При этом использовалась методика приближенного расчета. *Результаты.* Предложена практическая методика синтеза системы резервирования с использованием интерактивной среды для программирования, численных расчетов и визуализации Mathworks Matlab. *Выводы.* Сформулированная методика позволяет производить расчеты оптимальных технических систем по критерию сложности системы резервирования, обеспечивающих сочетание наилучшей надежности с простотой реализации, безызбыточностью, минимальной массой и, соответственно, стоимостью.

Ключевые слова: надежность, резервирование, оптимизация резервирования, методы обеспечения надежности, автоматизированные системы.

Abstract. *Background.* This article is devoted to the development of the method of element-by-element redundancy, which implements a structural approach to redundancy, involving the inclusion in the scheme of the device of additional elements that allow to compensate for the failures of individual parts of the device. It is necessary to determine the parameters of the reservation, as provided that the weight, dimensions, cost should not be higher than the permissible limit level, and the reliability of the maximum, and provided that the reliability should not be lower than the required, and the weight, dimensions and cost-minimum. *Materials and methods.* In this article the method of the optimized redundant system calculation according to the criterion of its complexity was considered. For this calculation it is supposed to use probabilistic methods of reliability calculation. The method of approximate calculation was used. *Results.* A practical method of reservation system synthesis using an interactive environment for programming, numerical calculations and visualization of Mathworks Matlab is proposed. *Conclusions.* The methodology allows to make calculations of optimal technical systems according to the criterion of complexity of the reservation system, providing the best reliability with ease of implementation, break-even, minimum weight and cost, respectively.

Key words: reliability, redundancy, reliability assurance methods, optimization of reservation.

Введение

Опыт эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры показывает, что основными причинами ее выхода из строя являются недостаточная надежность комплектующих элементов или нарушение условий их использования, схемно-конструктивные и производственные недостатки или слабая защищенность от воздействия внешних условий [1, 2].

Под надежностью понимают свойство изделия сохранять в течение заданного времени в пределах установленных норм значения функциональных параметров при определенных условиях (за-

данные режимы и условия эксплуатации, технического обслуживания, хранения и транспортирования) [3].

Одним из самых эффективных методов повышения надежности систем является введение избыточности в систему (резервирование). Оно позволяет ослабить влияние схемно-конструктивных недостатков и увеличить надежность системы. На рис. 1 представлена классификация методов резервирования [1–4].



Рис. 1. Классификация методов резервирования

В радиоэлектронной промышленности широкое распространение нашел структурный вид резервирования, предполагающий включение в схему устройства дополнительных элементов, которые позволяют скомпенсировать отказы отдельно взятых частей устройства [3, 4].

По способу включения резервных элементов в радиоэлектронной аппаратуре различают: постоянное резервирование, резервирование замещением и скользящее резервирование.

Постоянное резервирование предполагает включение резервных элементов вместе с основными в течение всего времени работы, при этом они находятся в одинаковом режиме.

При использовании резервирования замещением необходимо предусмотреть дополнительный элемент, который бы анализировал состояние схемы и в момент отказа осуществлял переключение на резервный элемент.

В скользящем резервировании любой резервный элемент может замещать любой основной.

По режимам работы резервы классифицируются на нагруженные (горячие) – резервные элементы нагружены так же, как и основные; облегченные (ждущие) – резервные элементы нагружены в меньшей степени по сравнению с основными; ненагруженные (холодные) – резервные элементы не несут нагрузки.

Очевидные недостатки резервирования – это увеличение габаритов и массы системы, потребляемой мощности, а также стоимости аппаратуры. В этом случае возникают задачи оптимизации резервирования:

- 1) масса, габариты, стоимость должны быть не выше допустимого предельного уровня, а надежность при этом максимальной;
- 2) надежность должна быть не ниже требуемой, а масса, габариты и стоимость – минимальными.

Рассмотрим математическую модель поэлементного резервирования аппаратуры.

Методика поэлементного резервирования электронной аппаратуры: прямая постановка задачи

Пусть имеется нерезервированная система, состоящая из W блоков, находящихся в основном соединении. Заданы вероятности отказов $q_1, q_2, \dots, q_w$ и массы соответствующих блоков $m_1, m_2, \dots, m_w$ (рис. 2).

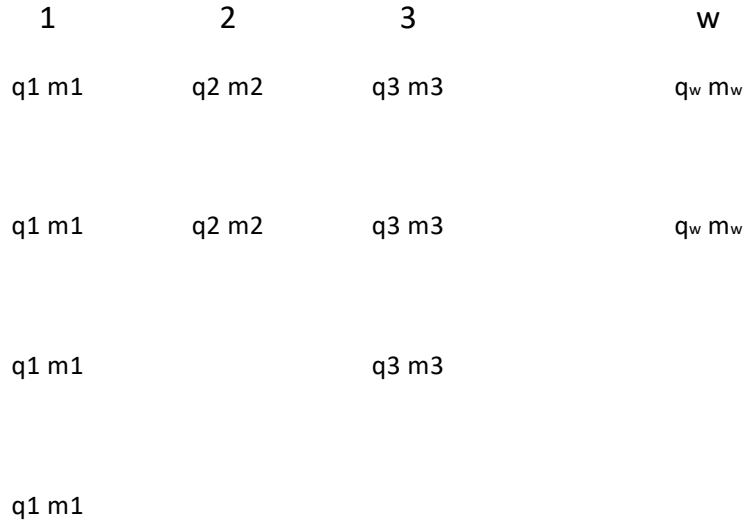


Рис. 2. Структурная схема оптимизации электронного устройства

Требуется провести поблочное резервирование системы так, чтобы масса не превышала заданную $M_{\text{доп}}$, а вероятность безотказной работы системы $P_{\text{рез}}$ была максимальной.

Масса исходной системы:

$$M_0 = \sum_{j=1}^w m_j.$$

Вероятность ее безотказной работы

$$P_0 = \prod_{j=1}^w (1 - q_j).$$

Если каждый из блоков исходной системы резервируется с помощью $s_j - 1$ резервных блоков, то масса зарезервированной системы будет [3]

$$M_{\text{рез}} = \sum_{j=1}^w m_j s_j,$$

а вероятность безотказной работы

$$P_{\text{рез}} = \prod_{j=1}^w (1 - q_j^s),$$

где дробная кратность резервирования определяется из зависимости

$$s_j^0 = \left(\ln \frac{1}{q_j} \right)^{-1} \ln \left(\frac{y_0 - g_j}{g_j} \right),$$

в которой неизвестное y_0 определяется из трансцендентного уравнения

$$\sum_{j=1}^w g_j \ln(y_0 + g_j) = M_{\text{доп}} + \sum_{j=1}^w g_j \ln g_j,$$

для разрешения которого g_j к каждому значению m_j находится из отношения

$$g_j = m_j / \ln(q_j)^{-1}.$$

Оценка s_j^0 представляет дробную кратность, а резервировать возможно только целочисленными значениями кратности, то для выполнения ограничения:

$$\sum_{j=1}^w S_j^* m_j \leq M_{\text{доп}}.$$

Необходимо округлить все s_j^0 как по избытку, так и по недостатку для всех w блоков резервируемой системы.

Поскольку решения трансцендентного уравнения в замкнутой форме не существует, предлагается приближенное решение, в соответствии с которым находится первое приближение

$$y^{(1)} = \exp(B / \sum_{j=1}^w g_j),$$

где B является правой (вычислимой) частью трансцендентного уравнения

$$B = M_{\text{доп}} + \sum_{j=1}^w g_j \ln g_j.$$

Для второго приближения используется оценка

$$Y^{(2)} = y_0^{(1)} + \left(\sum_{j=1}^w g_j \ln(y + g_j) - B \right) / \left(\sum_{j=1}^w g_j / (g_j + y^{(1)}) \right).$$

Третье приближение:

$$y^{(3)} = (y^{(1)} + y^{(2)}) / 2.$$

Для выбора варианта резервирования среди целых чисел, отличающихся от s_j^0 не больше, чем на единицу, выбираются такие s^* , которые по сравнению с системами других целых чисел отвечают следующим условиям:

$$\sum_{j=1}^w m_j (S_j^0 - S_j^*) \geq 0.$$

Если несколько систем целочисленных значений $\{S_j^*\}$ обеспечивают одинаковую минимальную сумму произведений, то выбирают такую, для которой

$$\sum_{j=1}^w m_j (S_j^0 - S_j^*)^2 = \min.$$

По выбранной оптимальной комбинации целочисленных значений S_j^* вычисляется вероятность безотказной работы зарезервированной системы

$$P_{\text{рез}} = \prod_{j=1}^w (1 - q_j^s).$$

В итоге получаем алгоритм оптимизации резервированной системы, который позволяет рассчитывать оптимальное количество резервных элементов, которое обеспечит максимальную надежность изделия при минимальной его массе.

Реализации методики оценки поэлементного резервирования электронной аппаратуры в среде Matlab

Основы информационного подхода при обеспечении надежности ЭА рассмотрены в работах [5, 6]. Алгоритм решения прямой задачи поэлементного резервирования для ЭА представлен на рис. 3 [7–10].



Рис. 3. Алгоритм методики поэлементного резервирования

Аналогичным образом можно рассмотреть обратную задачу. В этом случае требуется исходную систему из w элементов с вероятностями отказов и соответствующими массами зарезервировать при заданном уровне вероятности безотказной работы $P_{рез}$, который необходимо обеспечить минимальной затратой массы $M_{рез\ min}$.

Приведем пример использования данной методики в среде Matlab [11, 12].

Предположим, нам задана нерезервированная система, состоящая из пяти блоков, вероятности их отказов и соответствующие массы приведены в табл. 1.

Таблица 1

№	1	2	3	4	5
q	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
m	5	3	2	4	1

Требуется зарезервировать систему так, чтобы масса ее не превышала бы 60 кг, а вероятность безотказной работы была бы максимальной.

Для решения этой задачи напомним небольшой скрипт в среде Matlab.

Для начала зададим входные данные задачи. Данные зададим в виде массивов (рис. 4).

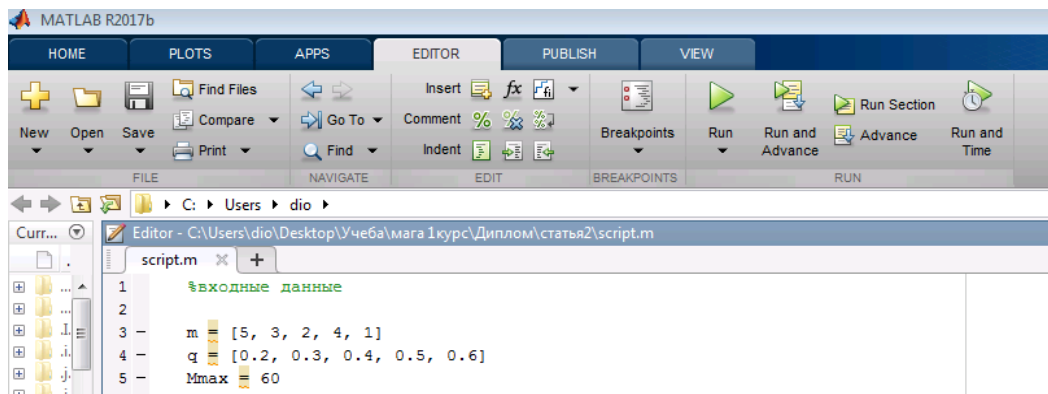


Рис. 4. Определение входных данных задачи

Затем реализуем основной алгоритм для расчета оптимизации резервных элементов (рис. 5).

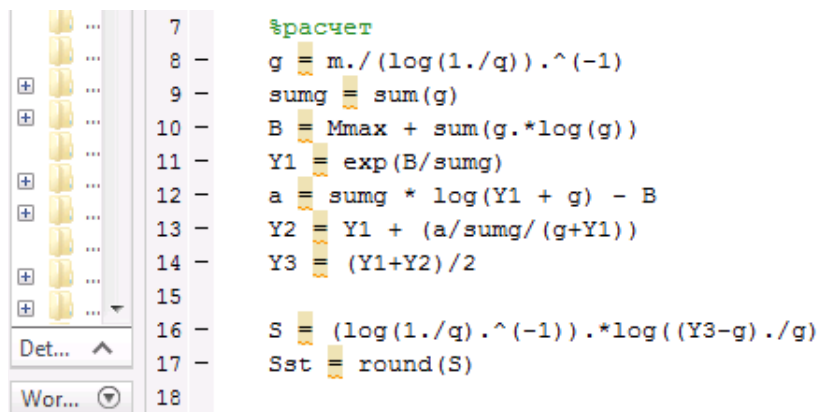


Рис. 5. Решение задачи оптимизации

Выберем комбинацию резервных элементов и проведем итоговые проверочные расчеты (рис. 6–8).

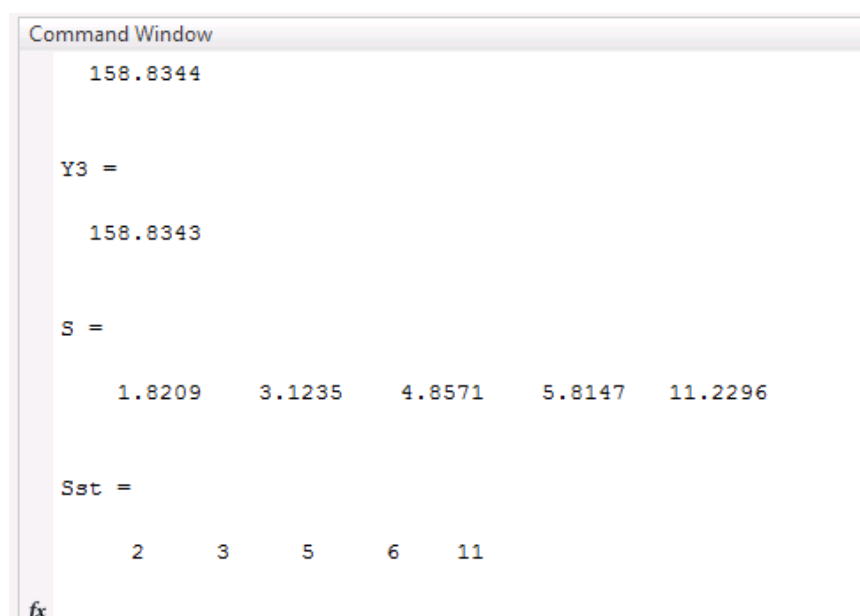


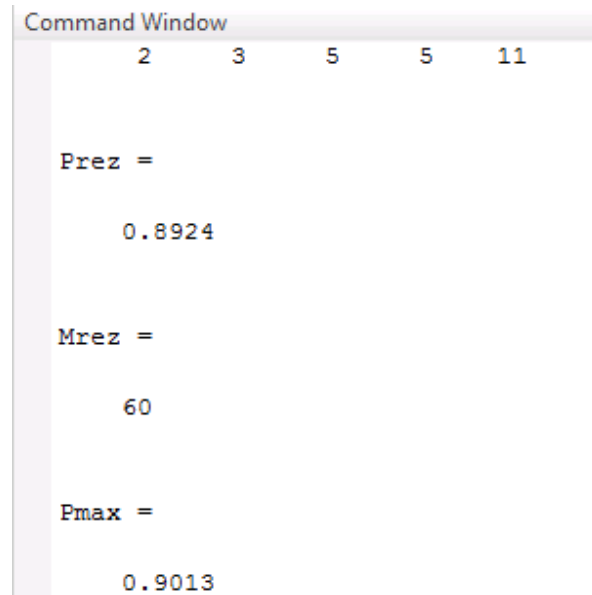
Рис. 6. Результаты расчета

```

19      %выбор количества резервных элементов
20 -    Sst1 = [2, 3, 5, 5, 11]
21      %расчет итоговых значений
22 -    Prez = prod(1.-q.^Sst1)
23 -    Mrez = sum(m.*Sst1)
24 -    Pmax = Y3^5/prod(g+Y3)

```

Рис. 7. Проверочные расчеты



```

Command Window
      2      3      5      5      11

      Prez =

      0.8924

      Mrez =

      60

      Pmax =

      0.9013

```

Рис. 8. Результаты проверочных расчетов

Как видно из результатов расчета, нам удалось приблизиться к максимально возможному показателю надежности, при этом мы не превысили требуемое ограничение по массе изделия.

Заключение

Предложенная математическая модель поэлементного резервирования узлов ЭА может найти применение при разработке алгоритмов оптимизации резервирования, как при условии, что масса, габариты, стоимость должны быть не выше допустимого предельного уровня, а надежность при этом максимальной, так и при условии, что надежность должна быть не ниже требуемой, а масса, габариты и стоимость – минимальными.

Такая модель может быть использована инженерами при проектировании сложных технических систем, таких как радиоэлектронные изделия, или может найти применение при расчетах несущих конструкций. Предлагаемые данной методикой оптимальные сочетания показателей надежности и минимизации массы предоставляют возможность производителям радиоэлектронной аппаратуры проектировать и изготавливать высоконадежные устройства, при этом, в некоторой степени, сокращать расходы на их производство путем использования минимального количества элементов.

Как уже было продемонстрировано выше, данная методика может быть реализована с помощью программных средств вычисления, что открывает возможность для реализации программного обеспечения, выполняющего расчеты. Таким образом, автоматизация поможет сократить время, затрачиваемое на этапе проектирования и расчетов.

Библиографический список

1. Основы теории надежности электронных средств / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – 100 с.
2. Чеканов, А. Н. Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры / А. Н. Чеканов. – М. : КноРус, 2012. – 440 с.

3. Боровиков, С. М. Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств : учеб.-метод. пособие / С. М. Боровиков, И. Н. Цырельчук, Ф. Д. Троян ; под ред. С. М. Боровикова. – Минск : БГУИР, 2010. – 68 с.
4. Чеканов, А. Н. Вопросы оптимизации БНК по критерию надежности / А. Н. Чеканов // Средства связи. – 1982. – № 2. – С. 13.
5. Информационная технология многофакторного обеспечения надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 4. – С. 75–79.
6. Чеканов, А. Н. Использование информационного подхода при оптимизации несущих конструкций / А. Н. Чеканов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 1998. – № 2 (30). – С. 83–91.
7. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
8. Камышная, Э. Н. Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры : учеб. пособие / Э. Н. Камышная, В. В. Маркелов, В. А. Соловьев. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 168 с.
9. Экранирование и межсоединения в ЭВА и РЭА. Расчеты надежности ЭВА и РЭА / Б. И. Белов, В. В. Шерстнев, В. В. Маркелов, В. В. Съедугин, А. Н. Чеканов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1980. – 40 с.
10. Камышная, Э. Н. Программное обеспечение конструкторских расчетов РЭС и ЭВС. Т. 4. Расчет надежности / Э. Н. Камышная, В. В. Маркелов, В. А. Соловьев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 32 с.
11. Власов, А. И. Реализация визуальных инструментов контроля качества в среде MATLAB / А. И. Власов, В. В. Маркелов, Н. А. Сергеева, Д. Е. Зотьева // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 4-2 (46). – С. 59–70.
12. Маркелов, В. В. Автоматизация методов входного статистического контроля при управлении качеством изделий электронной техники в среде MATHLAB / В. В. Маркелов, А. И. Власов, Д. Е. Зотьева // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 3 (7). – С. 38–43.

References

1. Yurkov N. K., Zatylnkin A. V., Polesskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Osnovy teorii nadezhnosti elektronnykh sredstv* [Fundamentals of reliability of electronic means]. Penza: Izd-vo PGU, 2013, 100 p.
2. Chekanov A. N. *Raschety i obespechenie nadezhnosti elektronnoy apparatury* [Calculations and ensuring the reliability of electronic equipment]. Moscow: Knorus, 2012, 440 p.
3. Borovikov S. M., Tsyrel'chuk I. N., Troyan F. D. *Raschet pokazateley nadezhnosti radioelektronnykh sredstv: ucheb.-metod. posobie* [Calculation of indicators of reliability of electronic equipment: proc.-method. benefit]. Minsk: BGUIR, 2010, 68 p.
4. Chekanov A. N. *Sredstva svyazi* [Means of communication]. 1982, no. 2, p. 13.
5. Yurkov N. K., Zatylnkin A. V., Polesskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2013, no. 4, pp. 75–79.
6. Chekanov A. N. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Bauman. Ser.: Priborostroenie* [Bulletin of Moscow state technical University. N. E. Bauman. Ser.: Instrument making]. 1998, no. 2 (30), pp. 83–91.
7. Yurkov N. K., Zatylnkin A. V., Polesskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102.
8. Kamyshnaya E. N., Markelov V. V., Solov'ev V. A. *Konstruktorско-tekhnologicheskie raschety elektronnoy apparatury: ucheb. posobie* [Design and technological calculations of electronic equipment: a textbook]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2014, 168 p.
9. Belov B. I., Sherstnev V. V., Markelov V. V., S'edugin V. V., Chekanov A. N. *Ekranirovanie i mezhsoedineniya v EVA i REA. Raschety nadezhnosti EVA i REA* [Shielding and interconnections in EVA and REA. The calculations of reliability of EVA and REA]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 1980, 40 p.
10. Kamyshnaya E. N., Markelov V. V., Solov'ev V. A. *Programmnoe obespechenie konstruktorskiykh raschetov RES i EVS. T. 4. Raschet nadezhnosti* [Software design calculations of RES and EVS. Vol. 4. Calculation of reliability]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N. E. Bauman, 2000, 32 p.
11. Vlasov A. I., Markelov V. V., Sergeeva N. A., Zot'eva D. E. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International research journal]. 2016, no. 4-2 (46), pp. 59–70.
12. Markelov V. V., Vlasov A. I., Zot'eva D. E. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 3 (7), pp. 38–43.

Макаров Антон Павлович

магистрант,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: makarov@iu4.bmstu.ru

Makarov Anton Pavlovich

master degree student,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Соловьев Владимир Анатольевич

доцент,
кафедра проектирования и технологии
производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005, Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: solovev@iu4.bmstu.ru

Soloviev Vladimir Anatolyevich

associate professor,
sub-department of design and production technology
of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

УДК 621.3

Макаров, А. П.

Оптимизация поэлементного резервирования электронной аппаратуры / А. П. Макаров,
В. А. Соловьев // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 4 (24). – С. 77–85. –
DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-8.