

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКОВ ДЛЯ СЕЛЕКЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИИ

Б. Ф. Безродный, С. А. Майоров

В настоящее время с целью обеспечения в соответствии с приказом № 31 ФСТЭК об информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами критически важных объектов встает задача импортозамещения электронных компонентов, включая различные микроэлектронные изделия, применяемых в ответственной электронной аппаратуре, используемой на этих критически важных объектах. При этом особую актуальность приобретает задача обеспечения при проведении мероприятий по импортозамещению требуемой высокой надежности указанной электронной аппаратуры. В силу меньшей стабильности технологического процесса изготовления качество, надежность и, соответственно, значения параметров импортозамещающих электронных изделий имеют больший, по сравнению с импортными аналогами, разброс. Поэтому на практике оказывается необходимым проведение предварительной селекции образцов этих изделий с целью выбора наиболее приемлемых для изготовления конкретного типа электронной аппаратуры образцов, т.е. для проведения ее «селективной сборки». Такую процедуру, как правило, проводят на основе статистического распознавания, считая из-за большого числа влияющих факторов распределения нормальными [1].

При этом для проведения контроля состояния образцов электронного изделия используют вектор из p параметров, принимаемых для простоты некоррелированными, а вследствие допущения нормального распределения и независимыми. При этом решающее правило будет иметь вид [1]

$$\sum_{j=1}^p \left\{ \frac{1}{\hat{\sigma}_{0j}^2} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \hat{a}_{0j})^2 - \frac{1}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \hat{a}_{1j})^2 + n \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \right\} \geq 0. \quad (1)$$

При выполнении неравенства контрольная выборка из n замеров вектора контролируемых параметров признается соответствующей классу S_1 , т.е. удовлетворяющих требованиям конкретного типа электронной аппаратуры, а при выполнении обратного неравенства – классу S_0 (неудовлетворяющих). В (1) $\hat{a}_i = (\hat{a}_{i1}, \dots, \hat{a}_{ip})$ и $\hat{M}_i = \text{diag}(\hat{\sigma}_{i1}^2, \dots, \hat{\sigma}_{ip}^2)$ – оценки векторов средних и ковариационных матриц распределений значений контролируемых параметров в различаемых классах образцов исследуемого электронного компонента, а $\bar{x}_i = (x_{i1}, \dots, x_{ip})$ – элементы контрольной выборки замеров вектора контролируемых параметров. При $n = 1$ контролю подвергается каждый отдельный образец, в противном случае – однородная партия образцов, имеющих практически идентичные качество и надежность.

Вероятности ошибок такого решающего правила, обеспечивающего селекцию отечественных электронных изделий при организации импортозамещения, подробно исследованы в [2]. Подобные методики селекции микроэлектронных изделий и иных электронных компонентов, комплекующих ответственную аппаратуру различного назначения, хорошо зарекомендовали себя уже давно. Они автоматизированы и используются при комплектации производства высоконадежных устройств и систем. Однако эти методики не позволяют напрямую задать допуск на значения контролируемых параметров, т.е. непосредственно определить границы изменения каждого из них, позволяющие гарантировать заданные вероятности ошибок селекции. В данной статье на основе анализа области заданной надежности, выделяемой в пространстве значений контролируемых параметров, решающим правилом (1) предлагается процедура определения таких границ изменения значений контролируемых параметров, позволяющая гарантировать исходные значения вероятностей ошибок селекции первого α и второго β рода.

С этой целью рассмотрим детально, такая область в пространстве значений контролируемых параметров определяет решающее правило (1). Учитывая известное неравенство для дисперсий [1] $\sigma_1^2 < \sigma_0^2$, получаем, что область G_1 представляет собой эллипсоид в декартовом произведении n пространств R_p . Отметим, что случай $n > 1$ соответствует групповому входному контролю надежности однородной партии образцов импортозамещающего электронного компонента. В этом случае, если обеспечена однородность партии, потребность в образцах исследуемого компонента велика, а время селекции существенно ограничено, с помощью разработанной в [3] методики определяется минимальный достаточный для осуществления селекции с заданными ограничениями на вероятности ошибок объем обучающей выборки, после чего из однородной партии выбираются равномерно n образцов, у них замеряются значения контролируемых параметров, после чего в случае их одновременного попадания в np -мерный эллипсоид вся однородная партия признается обладающей требуемым ресурсом надежности. В случае индивидуальной селекции образцов $n = 1$ правило селекции высекает в пространстве значений контролируемых параметров эллипсоид. При определении допусков на контролируемые параметры, гарантирующие заданные вероятности ошибок селекции, воспользуемся случаем $n = 1$. С этой целью преобразуем правило селекции (1) к виду

$$\sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\hat{\sigma}_{0j}^2} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \hat{a}_{0j})^2 - \frac{1}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \hat{a}_{1j})^2 + n \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \right\} \geq 0, \quad (2)$$

из анализа которого можно сделать вывод, что из неотрицательности выражения в фигурных скобках в (2) следует выполнение всего неравенства (1). Поэтому попадание значений контролируемых параметров в эллипсоид в пространстве R_p , определяемый приравнением к нулю выражения в фигурных скобках из (2) (при $n = 1$) для всех элементов контрольной выборки оказывается достаточным условием для признания факта удовлетворения заданным требованиям по надежности для всей партии образцов импортозамещающего электронного компонента. Такая трактовка правила селекции (2) приводит к незначительному (5–7 %) увеличению вероятности ошибки второго рода, но позволяет значительно упростить процедуру его проверки и явно оценить допуски на контролируемые параметры.

Преобразуем правило (2) при $n = 1$

$$\frac{1}{\hat{\sigma}_{0j}^2} \sum_{j=1}^p (x_j - \hat{a}_{0j})^2 - \frac{1}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \sum_{j=1}^p (x_j - \hat{a}_{1j})^2 + \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \geq 0 \quad (3)$$

к виду уравнения эллипсоида:

$$\sum_{j=1}^p \frac{(x_j - b_j)^2}{c_j^2} \leq 1, \quad (4)$$

где

$$b_j = \frac{(\hat{a}_{0j} \hat{\sigma}_{1j}^2 - \hat{a}_{1j} \hat{\sigma}_{0j}^2)}{\hat{\sigma}_{1j}^2 - \hat{\sigma}_{0j}^2}; \quad c_j^2 = \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2 \hat{\sigma}_{1j}^2}{\hat{\sigma}_{0j}^2 - \hat{\sigma}_{1j}^2} \left(\sum_{j=1}^p \left[\frac{(\hat{a}_{0j} - \hat{a}_{1j})^2}{\hat{\sigma}_{0j}^2 - \hat{\sigma}_{1j}^2} + \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \right] \right).$$

Неравенство (4) определяет в пространстве значений контролируемых параметров искомую область заданной надежности, а в случае селекции по значению одного интегрального или основного параметра ($p = 1$) – собственно допуск на этот параметр.

К примеру, если в качестве области заданной надежности принять описанный вокруг эллипсоида прямоугольный параллелепипед, т.е. задать простые ограничения на каждый j -й контролируемый параметр $b_j - c_j < x_j < b_j + c_j$, то вероятность ошибки первого рода увеличится на 15–20 %, а вероятность ошибки второго рода снизится на 5–10 %. В ряде случаев такое расши-

рение области заданной надежности на практике оказывается оправданным, поскольку в этом случае можно напрямую идентифицировать, по каким параметрам не удовлетворяет тот или иной образец импортозамещающего электронного компонента.

Можно поступить наоборот, и в качестве области заданной надежности принять прямоугольный параллелепипед, вписанный в эллипсоид (3). При этом среди всех параллелепипедов следует взять параллелепипед, имеющий максимальный объем с учетом весовой функции, представляющей плотность распределения для класса S_1 , что позволит минимизировать уменьшение области заданной надежности G_1 и сопутствующее этому увеличение вероятности ошибки селекции второго рода. Справедливости ради отметим, что в этом случае несколько снизится вероятность ошибки первого рода. Оба рассмотренных выше крайних случая на практике мало пригодны, так как в первом случае недопустимо увеличивается вероятность ошибки селекции первого рода α , а во втором случае, кроме вычислительной сложности решения экстремальной задачи, увеличивается вероятность ошибки селекции второго рода β , что в современных условиях экономически не оправдано. Поэтому предлагается решить задачу следующим образом, воспользовавшись подходом Неймана – Пирсона, задав в правой части неравенства (2) не ноль, а некоторую малую положительную величину δ , являющуюся параметром. В этом случае неравенство (2) примет вид

$$\frac{1}{\hat{\sigma}_{0j}^2} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \hat{a}_{0j})^2 - \frac{1}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \sum_{j=1}^p (x_{ij} - \hat{a}_{1j})^2 + \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \geq \delta, \quad (5)$$

а определяемый им эллипсоид будет определяться следующим образом:

$$\sum_{j=1}^p \frac{(x_j - b_j)^2}{c_j^2} \leq 1, \quad (6)$$

где

$$b_j = \frac{(\hat{a}_{0j} \hat{\sigma}_{1j}^2 - \hat{a}_{1j} \hat{\sigma}_{0j}^2)}{\hat{\sigma}_{1j}^2 - \hat{\sigma}_{0j}^2}; \quad c_j^2 = \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2 \hat{\sigma}_{1j}^2}{\hat{\sigma}_{0j}^2 - \hat{\sigma}_{1j}^2} \left(\sum_{j=1}^p \left[\frac{(\hat{a}_{0j} - \hat{a}_{1j})^2}{\hat{\sigma}_{0j}^2 - \hat{\sigma}_{1j}^2} + \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \right] - \delta \right).$$

Эти соотношения отличаются от соотношений (4) только наличием δ в выражении для c_j^2 . Другими словами, выражения (6) задают целое семейство подобных эллипсоидов в пространстве R_p . Причем при $\delta = 0$ мы имеем эллипсоид (4), а при увеличении δ эллипсоид (6) пропорционально уменьшается, сохраняя все соотношения и пропорции, задаваемые конкретными значениями оценок средних и дисперсий контролируемых параметров в различаемых классах образцов исследуемого импортозамещающего электронного компонента. При этом при достижении равенства

$$\delta = \sum_{j=1}^p \left[\frac{(\hat{a}_{0j} - \hat{a}_{1j})^2}{\hat{\sigma}_{0j}^2 - \hat{\sigma}_{1j}^2} + \ln \frac{\hat{\sigma}_{0j}^2}{\hat{\sigma}_{1j}^2} \right] \quad (7)$$

эллипсоид (6) вырождается в точку, которая чисто теоретически могла бы соответствовать случаю, когда значения контролируемых параметров определяются точно, и малейшие отклонения от их расчетных значений не допускаются. Однако это – предельный идеализированный случай, и мы его рассматривать не будем.

Теперь остается в качестве допусковой области принять описанный вокруг уменьшенного эллипсоида (6) прямоугольный параллелепипед, задаваемый неравенствами $b_j - c_j < x_j < b_j + c_j$, $j = 1, \dots, p$.

При этом границы допуска для каждого из p контролируемых параметров являются функциями параметра δ , так как $c_j = c_j(\delta)$.

Вероятности ошибок решающего правила, задаваемого таким параллелепипедом, являются в итоге функциями параметра δ и могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\beta(\delta) = 1 - \prod_{j=1}^p \left\{ \int_{b_j - c_j(\delta)}^{b_j + c_j(\delta)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_{1j}^2}} \exp \left\{ -\frac{(t_j - a_j)^2}{2\hat{\sigma}_{1j}^2} \right\} dt_j \right\}, \quad (8)$$

$$\alpha(\delta) = \prod_{j=1}^p \left\{ \int_{b_j - c_j(\delta)}^{b_j + c_j(\delta)} \frac{1}{\sqrt{2\pi\hat{\sigma}_{0j}^2}} \exp \left\{ -\frac{(t_j - a_j)^2}{2\hat{\sigma}_{0j}^2} \right\} dt_j \right\}.$$

При этом область изменения параметра δ ограничена снизу нулем, а сверху – значением из соотношения (7). Вероятности ошибок селекции первого и второго рода, задаваемые соотношениями (8), как функции переменной δ являются монотонными. При этом функция $\alpha(\delta)$ монотонно убывает с ростом δ от 0 до значения, определяемого соотношением (8), а функция $\beta(\delta)$ при таком изменении δ , наоборот, монотонно возрастает, так как область интегрирования в формулах (8) при этом сокращается, а все остальные величины остаются неизменными.

Будем считать, что на этапе формирования решающего правила (1) с помощью разработанной в [3] методики определен объем обучающей выборки, минимальный достаточный для осуществления селекции с заданными ограничениями $\alpha \leq \alpha_0$ и $\beta \leq \beta_0$ на вероятности ошибок первого и второго рода. Другими словами, при преобразовании области заданной надежности образцов импортозамещающего электронного компонента в пространстве значений контролируемых параметров R_p в прямоугольный параллелепипед необходимо сохранить указанные ограничения $\alpha \leq \alpha_0$ и $\beta \leq \beta_0$. Сделаем это следующим образом [4, 5].

Обозначим значение δ из (7) через δ_{\max} . Тогда областью изменения аргумента функций $\alpha(\delta)$ и $\beta(\delta)$ является отрезок $[0, \delta_{\max}]$. Как уже было упомянуто ранее, функция $\alpha(\delta)$ на этом отрезке монотонно убывает от $\alpha(0)$ до $\alpha(\delta_{\max}) = 0$, а функция $\beta(\delta)$, наоборот, монотонно возрастает от $\beta(0)$ до $\beta(\delta_{\max}) = 1$. Две эти тенденции оказываются противоречивыми.

При этом $\alpha(0)$ превышает достигнутое на этапе обучения ограничение α_0 , так как с учетом (4) интегрирование в (8) ведется в пределах прямоугольного параллелепипеда, описанного вокруг эллипсоида, определяющего область заданной надежности образцов импортозамещающего электронного компонента в пространстве значений контролируемых параметров R_p , в то время как $\beta(0)$ оказывается по той же причине меньше достигнутого на этапе обучения ограничения β_0 .

Рассмотрим наиболее простой вариант, когда ограничения на вероятности ошибок селекции α_0 и β_0 равны, т.е. $\alpha_0 = \beta_0$. В этом случае из вышеизложенного следует, что $\beta(0) < \alpha_0 = \beta_0 < \alpha(0)$, а с учетом установленного выше монотонного характера непрерывного изменения функций $\alpha(\delta)$ и $\beta(\delta)$ на отрезке $[0, \delta_{\max}]$ уравнение

$$\alpha(\delta) = \beta(\delta) \quad (9)$$

обязательно имеет и притом единственный корень δ^* .

Если в результате оказывается, что

$$\alpha(\delta^*) = \beta(\delta^*) \leq \alpha_0 = \beta_0, \quad (10)$$

то допусковый параллелепипед, соответствующий значению параметра $\delta = \delta^*$, оказывается оптимальным, и его границы надо принять в качестве искомым допусков на контролируемые параметры исследуемого импортозамещающего электронного компонента, которые надлежит использовать при задании требований по надежности в договорах или иных документах на поставку образцов этого импортозамещающего электронного компонента.

Если же неравенство в (10) не выполняется, то в качестве оптимального значения параметра δ следует принять обязательно существующий корень δ_a уравнения [6, 7]

$$\alpha(\delta) = \alpha_0. \quad (11)$$

При этом вероятность ошибки селекции второго рода β окажется несколько выше своего ограничения β_0 , но этого, к сожалению, избежать уже не удастся [8].

Данная процедура формирования допусков на контролируемые параметры образцов импортозамещающих электронных компонентов, позволяющая гарантировать, что их надежность не уступает импортному замещаемому аналогу, допускает применение и в случае различных ограничений на вероятности ошибок селекции первого и второго рода α_0 и β_0 .

Список литературы

1. Безродный, Б. Ф. Оценка допусков на критичные параметры импортозамещающих электронных компонентов / Б.Ф. Безродный, С.А. Майоров // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 174–176.
2. Безродный, Б. Ф. Вероятности ошибок селекции импортозамещающих электронных компонентов / Б. Ф. Безродный, С. А. Майоров // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 170–174.
3. Безродный, Б. Ф. Обеспечение заданной достоверности селекции импортозамещающих электронных компонентов / Б. Ф. Безродный, С. А. Майоров // Труды международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 176–179.
4. Гришко, А. К. Математическое моделирование системы обеспечения тепловых режимов конструктивно-функциональных модулей радиоэлектронных компонентов / А. К. Гришко, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Проектирование и технология электронных средств. – 2015. – № 3. – С. 27–31.
5. Boolean matrices in problems on determining the state of discrete components in computerized measurement systems / N. K. Yurkov, A. V. Gorish, N. N. Novikov, L. A. Kladenok, A. V. Blinov // Measurement Techniques. – 2000. – Vol. 43, № 6. – P. 481–485.
6. Yurkov, N. K. Diagnosis of restorable components of special-purpose on-board data-acquisition systems / N. K. Yurkov, A. V. Blinov, D. S. Maksud // Measurement Techniques. – 2000. – Vol. 43, № 7. – P. 578–580.
7. Acceptance Checking Methods for UHF Electronic Components / N. K. Yurkov, A. V. Blinov, A. G. Kanakov, V. A. Trusov // Measurement Techniques. – 2000. – Vol. 43, № 10. – P. 895–901.
8. Yurkov, N. K. Information features of multi-extremal functions for describing the functioning indicators of the components of information measurement systems / N. K. Yurkov, A. V. Blinov, A. T. Erokhin // Measurement Techniques. – 2000. – Vol. 43, № 8. – P. 660–664.

Безродный Борис Федорович

доктор технических наук, профессор,
заместитель руководителя центра кибербезопасности,
Научно-исследовательский
и проектно-конструкторский институт
информатизации, автоматизации
и связи на железнодорожном транспорте
(105082, Россия, г. Москва, Нижегородская ул, 27/1)
E-mail: boris.bezrodny@yandex.ru

Майоров Сергей Алексеевич

научный сотрудник,
Межрегиональное общественное учреждение
«Институт инженерной физики»
(142210, Россия, Московская обл., г. Серпухов,
Б. Ударный пер., 1 «А»)
E-mail: info@iifrf.ru

Bezrodnyy Boris Fedorovich

doctor of technical sciences, professor,
deputy head of the center for cybersecurity,
Research and Design Institute
for Information Technology, Automation
and Communication on Railway Transport
(105082, 27/1 Nijegorodskaja street, Moscow, Russia)

Mayorov Sergey Alekseevich

stuff scientist,
Inter-regional public institution
"Institute of Engineering Physics"
(142210, 1 «А» B. Udarniy lane,
Serpuhkov, Moscow region, Russia)

Аннотация. Во исполнение приказа № 31 ФСТЭК об информационной безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами критически важных объектов, предусматривающего максимальное импортозамещение электронных компонентов, используемых в аппаратуре, которой оснащены эти объекты, предложен подход к обеспечению высокой надежности импортозамещающих электронных компонентов на основе проведения предварительной селекции их образцов. Поскольку известные методики не позволяют напрямую определить границы изменения каждого из контролируемых параметров электронного компонента, позволяющие гарантировать заданные вероятности ошибок селекции, в данной статье на основе анализа области заданной надежности,

Abstract. In execution of the Order of FSTЕК No. 31 on the information security of automated process control systems of critical facilities prescribing highest possible substitution of imported electronic components used in the equipment of such facilities, an approach is suggested to ensuring high dependability of import-substituting electronic components based on preliminary selection of samples. As the existing methods do not allow directly identifying the limits of variation of each controlled parameter of an electronic component ensuring the specified selection error probabilities, this article, based on an analysis of the target dependability space defined within the controlled parameter values space by means of the decision rule of selection, suggests a procedure for identification of such limits of controlled parameter values variations providing for guaranteed initial values

выделяемой в пространстве значений контролируемых параметров решающим правилом селекции, предлагается процедура определения таких границ изменения значений контролируемых параметров, позволяющая гарантировать исходные значения вероятностей ошибок селекции первого α и второго β рода.

Ключевые слова: импортозамещение, электронные компоненты, селекция, решающее правило, вероятности ошибок, границы допустимого изменения параметров.

of selection error probability of the first α and second β types.

Key words: import substitution, electronic components, selection, decision rule, error probabilities, limits of allowable parameters variation.

УДК 621.396.69.01

Безродный, Б. Ф.

Определение допусков для селекции электронных компонентов при импортозамещении /
Б. Ф. Безродный, С. А. Майоров // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 35–40.
DOI 10.21685/2307-4205-2016-3-6.