



УДК 621.396.664

М. Н. Селуянов

Применение общего логико-вероятностного метода при моделировании функционирования ответственных систем

Предложено использовать общий логико-вероятностный метод для автоматизированного расчета показателей достоверности контроля и технического риска резервированных цифро-аналоговых устройств. Показано, что применение указанного метода освобождает пользователя от составления расчетных формул и позволяет существенно сократить время вычислений.

Ключевые слова: достоверность контроля, логико-вероятностный метод, технический риск, моделирование.

Введение

Предлагается использовать моделирование формулы полной вероятности, формулы Байеса и технического риска цифро-аналоговых устройств для модельного отображения функционирования ответственных систем общим логико-вероятностным методом (ОЛВМ) [1], который реализован в нескольких образцах программных комплексов (ПК) автоматизированного структурно-логического моделирования (АСМ): ПК АСМ 2001, АРБИТР.

В целом ОЛВМ и его реализация в АСМ имеют ряд преимуществ в силу того, что они:

- обладают теоретически повышенной точностью оценок;
- требуют составления только логической структурно-функциональной схемы объекта (в терминах ОЛВМ – схемы функциональной целостности (СФЦ), т. е. специализированной знаковой системы, графического языка записи событийных и логических условий реализации исследуемого свойства системы);
- освобождают пользователя от составления расчетных формул и вычислительного алгоритма;
- предоставляют пользователю оценки значимостей элементов, что избавляет его от построения множества графиков.

В связи с этим предлагается использовать технологию АСМ для решения задач анализа радиоэлектронных систем с использованием инженерных расчетов.

Автоматизированный расчет достоверности контроля ответственных систем

Известно, что существующие автоматизированные средства контроля (АСК) как встроен-

ные, так и внешние, могут допускать ошибки, связанные с классификацией события A_i как \bar{A}_i (ложный отказ) и \bar{A}_j как события A_j (необнаруженный отказ).

Вероятность правильной оценки результата контроля (достоверность контроля) представляет собой сумму

$$D = D_{00} + D_{11}, \quad (1)$$

где D_{00} – условная вероятность положительного результата контроля исправности (работоспособности) объекта контроля (ОК);

D_{11} – условная вероятность положительного результата контроля неисправности (неработоспособности) ОК.

Аналогично недостоверность контроля \bar{D} можно представить как

$$\bar{D} = 1 - D = \bar{D}_{00} + \bar{D}_{11}, \quad (2)$$

где \bar{D}_{00} – условная вероятность забраковать работоспособный ОК при контроле;

\bar{D}_{11} – условная вероятность пропустить неработоспособный ОК при контроле.

Достоверность контроля вычислим по формуле

$$\begin{aligned} D &= \bar{D}_{00} + \bar{D}_{11} = P(AB) + P(\bar{A}\bar{B}) = \\ &= P(A)P(B/A) + P(\bar{A})P(\bar{B}/\bar{A}), \end{aligned} \quad (3)$$

а недостоверность контроля

$$\begin{aligned} \bar{D} &= D_{00} + D_{11} = P(A\bar{B}) + P(\bar{A}B) = \\ &= P(A)P(\bar{B}/A) + P(\bar{A})P(B/\bar{A}). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь A , \bar{A} – события, состоящие в том, что объект контроля в действительности исправен (работоспособен) и неисправен (неработоспособен);



B и \bar{B} – события, состоящие в признании объекта контроля по результатам контроля исправным (работоспособным) и неисправным (неработоспособным);

$P(A)$, $P(\bar{A})$ – безусловные априорные вероятности событий A и \bar{A} ;

$P(B/A)$ – условная вероятность того, что АСК исправный объект контроля признают исправным;

$P(\bar{B}/\bar{A})$ – условная вероятность того, что АСК неисправный объект контроля признают неисправным;

$P(B/\bar{A})$ – условная вероятность того, что АСК неисправный объект контроля признают исправным;

$P(\bar{B}/A)$ – условная вероятность того, что АСК исправный объект контроля признают неисправным.

Вычислим эти вероятности, для чего введем следующие обозначения:

P_0 – априорная вероятность исправного (работоспособного) состояния ОК к моменту контроля;

Q_0 – априорная вероятность неисправного (неработоспособного) состояния ОК к моменту контроля.

Автоматизированные средства контроля могут находиться в одном из следующих состояний:

- работоспособны с вероятностью $P_{ск}$ безотказной работы средств контроля (СК);
- возник такой отказ в АСК, при котором АСК признают ОК работоспособным или не-

работоспособным независимо от его действительного состояния с вероятностью $q_{и}$ (постоянно годен), $q_{н}$ (постоянно не годен);

- возник такой отказ в АСК, при котором выдаваемая АСК оценка противоположна истинному состоянию ОК с вероятностью $q_{ни}$.

Тогда имеем следующую группу несовместных событий:

$$P_{ск} + q_{и} + q_{н} + q_{ни} = 1.$$

На основании работы [2] получим:

$$D = P_{ск} [P_0 + v(Q_0 - \beta - k\alpha) - \alpha(1 - k)] + P_0 q_{и} + Q_0 [q_{н} + q_{ни}(1 - v)]; \quad (5)$$

$$\bar{D} = P_{ск} [Q_0 - v(Q_0 - \beta - k\alpha) + \alpha(1 - k)] + P_0 q_{н} + Q_0 q_{и} + q_{ни}(P_0 + Q_0 v), \quad (6)$$

где α – вероятность ложного отказа;

β – вероятность необнаруживаемого отказа;

v – полнота контроля;

$$k = \frac{Q_0}{P_0}.$$

Тогда вероятности, входящие в формулы (5) и (6), могут быть рассчитаны по формулам, приведенным в табл. 1, 2 [2].

На рис. 1 показано окно автоматизированного моделирования ПК АСМ 2001 [1] в форме структурной СФЦ для автоматизации расчетов обобщенных показателей достовер-

Таблица 1

Оценки условных вероятностей для расчета D

Ограничения	$P(B/A)$	$P(\bar{B}/\bar{A})$
1. $P_{ск} \neq 1$, $q_{ни} = 0$, $q_{и} = q_{н} = Q_{ск}/2$	$\frac{P_0 - \alpha}{P_0}$	$P_{ск} \left(\frac{Q_0 - \beta}{Q_0} \right) v + q_{н} + P_{ск} \frac{\alpha}{P_0} (1 - v)$
2. $P_{ск} = 1$, $q_{и} = q_{н} = q_{ни} = 0$	$\frac{P_0 - \alpha}{P_0}$	$v \left(\frac{Q_0 P_0 - \beta P_0 - \alpha Q_0}{P_0} \right) + \frac{\alpha}{P_0}$
3. $P_{ск} = 1$, $\alpha = 0$, $\beta = 0$	1	v
4. $P_{ск} = 1$, $v = 1$	$\frac{P_0 - \alpha}{P_0}$	$\frac{Q_0 - \beta}{Q_0}$



Таблица 2

Оценки условных вероятностей для расчета \bar{D}

Ограничения	$P(\bar{B}/A)$	$P(B/\bar{A})$
1. $P_{ck} \neq 1, q_{ни} = 0, q_{и} = q_n = Q_{ck}/2$	$q_n + P_{ck} \frac{\alpha}{P_0}$	$P_{ck} \left(\frac{P_0 - \alpha}{P_0} \right) (1 - v) + q_{и} + P_{ck} v \frac{\beta}{Q_0}$
2. $P_{ck} = 1, q_{и} = q_n = q_{ни} = 0$	$\frac{\alpha}{P_0}$	$\left(\frac{P_0 - \alpha}{P_0} \right) (1 - v) + v \frac{\beta}{Q_0}$
3. $P_{ck} = 1, \alpha = 0, \beta = 0$	0	$1 - v$
4. $P_{ck} = 1, v = 1$	$\frac{\alpha}{P_0}$	$\frac{\beta}{Q_0}$

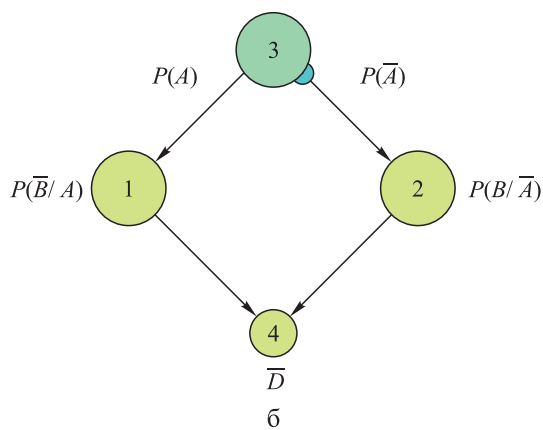
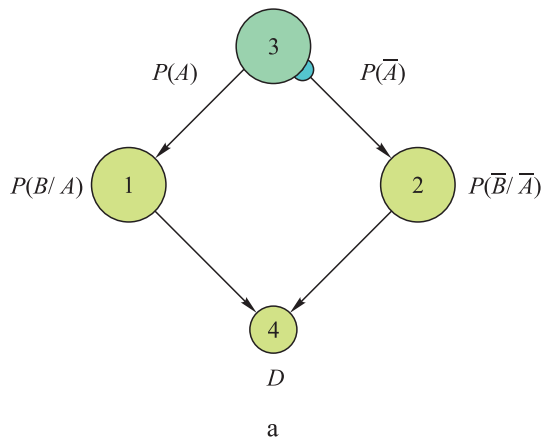


Рис. 1. Схемы функциональной целостности с отражением формулы полной вероятности для показателей достоверности D (а) и недостоверности \bar{D} (б) контроля.

ности D (а) или недостоверности \bar{D} (б) контроля.

Используя программный комплекс ПК АСМ 2001, после автоматизированного расчета достоверности контроля при $P(B/A) = 0,99918, P(\bar{B}/\bar{A}) = 0,99473, P(A) = 0,9$

имеем $D = 0,998735$. Некоторые авторы [2] рассматривают две вероятностные оценки: достоверность D_r контроля исправного состояния ОК и достоверность D_n контроля неисправного состояния ОК. Вероятности D_r и D_n являются апостериорными вероятностями исправного и неисправного состояний ОК соответственно и могут быть найдены по формуле Байеса

$$D_r = \frac{P(A)P(B/A)}{P(A)P(B/A) + P(\bar{A})P(\bar{B}/\bar{A})}; \quad (7)$$

$$D_n = \frac{P(\bar{A})P(\bar{B}/\bar{A})}{P(\bar{A})P(\bar{B}/\bar{A}) + P(A)P(\bar{B}/A)}. \quad (8)$$

Сравнение формул (3), (7), (8) позволяет связать обобщенный показатель ДК с достоверностями контроля D_r и D_n соотношением

$$D = \varepsilon D_r + \eta D_n, \quad (9)$$

где

$$\varepsilon = P(A)P(B/A) + P(\bar{A})P(\bar{B}/\bar{A}) = D_{00} + \bar{D}_{11};$$

$$\eta = P(\bar{A})P(\bar{B}/\bar{A}) + P(A)P(\bar{B}/A) = \bar{D}_{00} + D_{11}.$$

Для вычисления D_r и D_n воспользуемся ОЛВМ и составим СФЦ (рис. 2).

Вычисление D_r производится следующим образом. Вначале задаются вероятности $P(A)$ и $P(B/A)$, вычисляется числитель выражения (7). Затем рассчитывается знаменатель после подстановки значений вероятностей $P(A), P(\bar{B}/\bar{A}), P(\bar{A})$ и $P(\bar{B}/A)$. После деления числителя (7) на знаменатель (10) по-

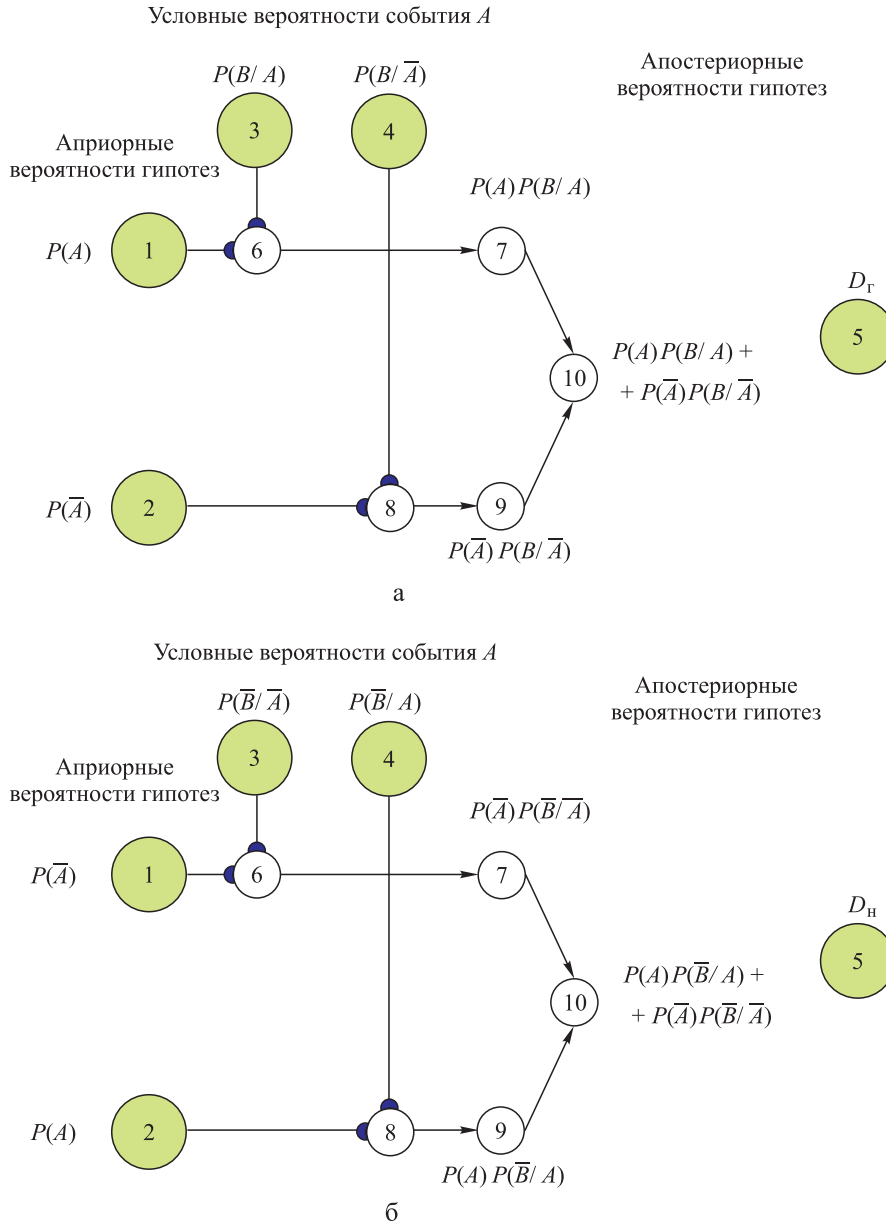


Рис. 2. Схемы функциональной целостности, реализующие формулы Байеса для вычисления D_G (а) и D_H (б)

лучаем искомое значение для D_G . Аналогично рассчитывается значение D_H .

Автоматизированный расчет технического риска резервированного цифро-аналогового преобразователя

Рассмотрим моделирование технического риска резервированного цифро-аналогового преобразователя (РЦАП), проведя его расчет. Так, для рассматриваемого примера анализа РЦАП расчет технического риска можно выполнить на основе СФЦ, представленной на рис. 3. С помощью событий p_3 и p_4 , представленных функциональными вершинами 3 и 4, в СФЦ вводим параметры $p_3 = 0,3$ и

$p_4 = 0,4$ поражения (нестойкости) элементов 1 и 2 при возникновении поражающего фактора p_5 (удар, взрыв, пожар и т. п.).

Система логических уравнений для построения СФЦ (см. рис. 3) имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= x_1, & y_5 &= x_5, \\
 y_2 &= x_2, & y_6 &= \bar{y}_3 y_1, \\
 y_3 &= x_3 y_5, & \bar{y}_6 &= y_3 + \bar{y}_1, \\
 \bar{y}_3 &= \bar{x}_3 + \bar{y}_5, & y_7 &= \bar{y}_4 y_2, \\
 y_4 &= x_4 y_5, & \bar{y}_7 &= y_4 + \bar{y}_2, \\
 \bar{y}_4 &= \bar{x}_4 + \bar{y}_5, & y_8 &= \bar{y}_6 \bar{y}_7, \\
 y_9 &= \bar{y}_6 y_7, & y_{10} &= y_6 \bar{y}_7.
 \end{aligned}$$

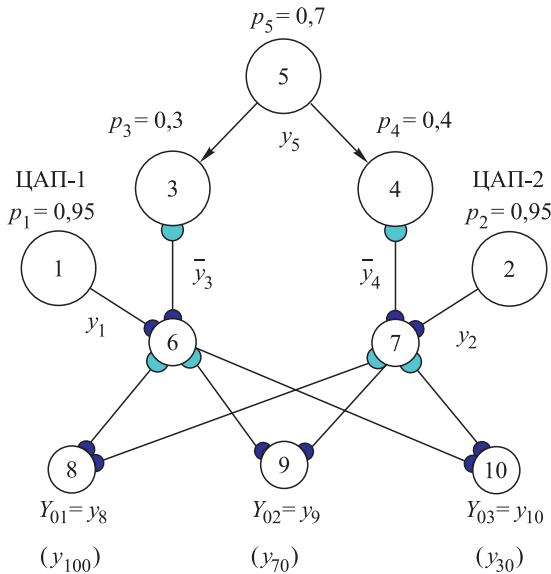


Рис. 3. Схема функциональной целостности технического риска резервированного цифро-аналогового преобразователя

С помощью программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ 2001) получена математическая модель и вычислены показатели технического риска возникновения аварии РЦАП для СФЦ (см. рис. 3).

Расчеты по формулам (10)–(12) могут быть выполнены как вручную, так и с использованием автоматизированного метода:

$$y_8 = p(X_3 X_5 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_1 \bar{X}_2 \vee X_3 X_4 X_5 \vee X_4 X_5 \bar{X}_1) = p_3 p_5 p_1 q_2 + q_1 q_2 + p_3 p_4 p_5 p_2 + q_3 p_4 p_5 q_1 p_2 = 0,101585; \quad (10)$$

$$y_9 = p(\bar{X}_5 \bar{X}_1 X_2 \vee X_3 \bar{X}_4 X_5 X_2 \vee \bar{X}_4 \bar{X}_1 X_2) = q_5 q_1 p_2 + p_3 q_4 p_5 p_2 + q_3 q_4 p_5 q_1 p_2 = 0,147915; \quad (11)$$

$$y_{10} = p(\bar{X}_5 X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_3 X_1 \bar{X}_2 \vee \bar{X}_3 X_4 X_5 X_1) = q_5 p_1 q_2 + q_3 p_5 p_1 q_2 + q_3 p_4 p_5 p_1 p_2 = 0,214415. \quad (12)$$

Сложив вероятности (10)–(12), вычислим общую вероятность возникновения аварии рассматриваемого устройства ЦАП:

$$pWR_{SIS} = 0,101585 + 0,147915 + 0,214415 = 0,463915.$$

Интерфейс пользователя ПК АСМ 2001 после решения задачи моделирования, расчета технического риска возникновения аварии, а также результаты автоматизированного расчета представлены на рис. 4, 5.

Из проведенного сравнения диаграмм (см. рис. 5) можно заключить, что применение РЦАП по сравнению с нерезервированным ЦАП (при отказе ЦАП-1) при тех же исходных данных и логическом критерии y_9 позволяет снизить технический риск в 4,62 раза. Из рис. 4 видно, что уменьшить значение показателя pWR_{SIS} можно проведением мероприятий, направленных на увеличение вероятностей p_1 и p_2 безотказной работы ЦАП-1 и ЦАП-2 (белые столбцы диаграммы) или на уменьшение вероятностей p_3 , p_4 и p_5 собы-

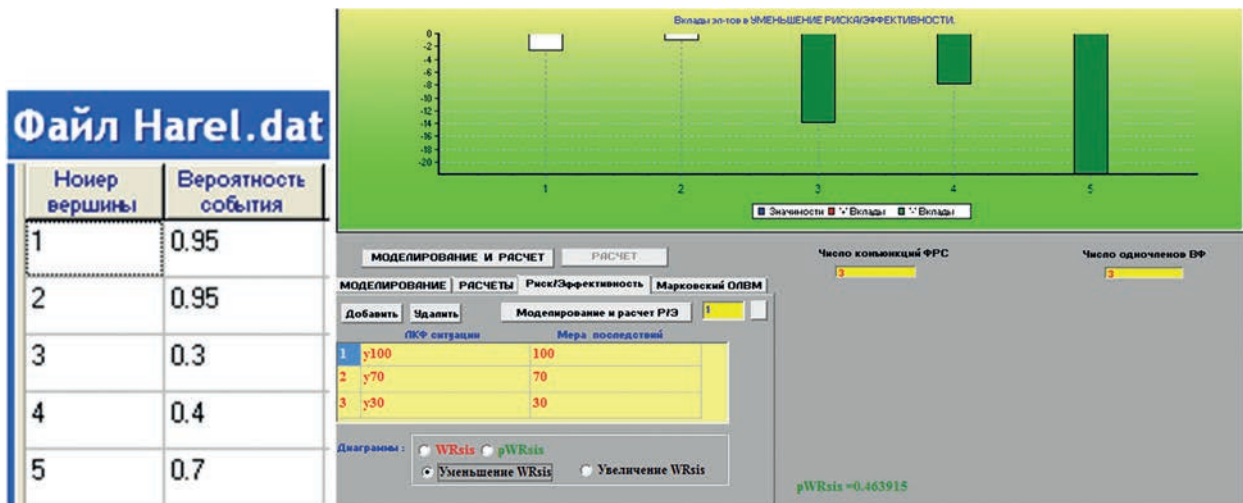
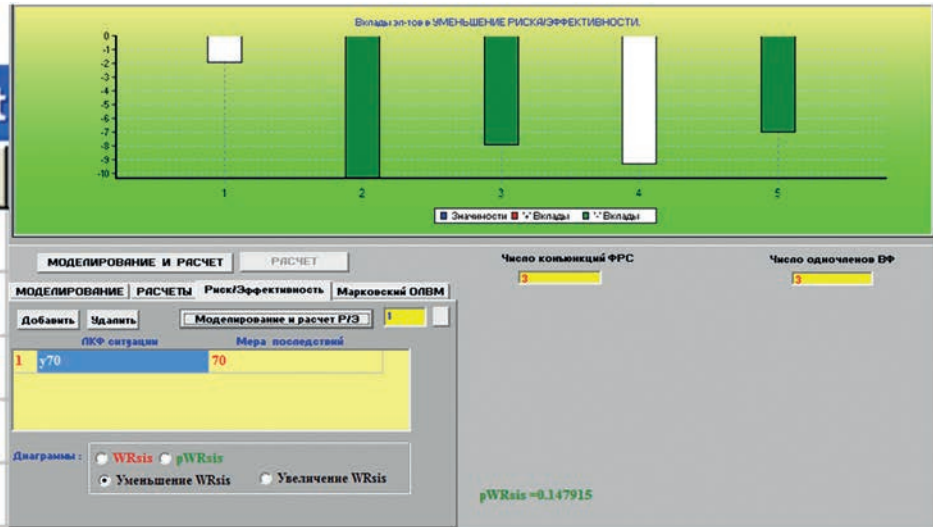


Рис. 4. Результаты расчетов общей вероятности аварии РЦАП при $p_3 = 0,3$, $p_4 = 0,4$ и $p_5 = 0,7$ по исходным параметрам (Файл Harel.dat)



Файл Harel.dat

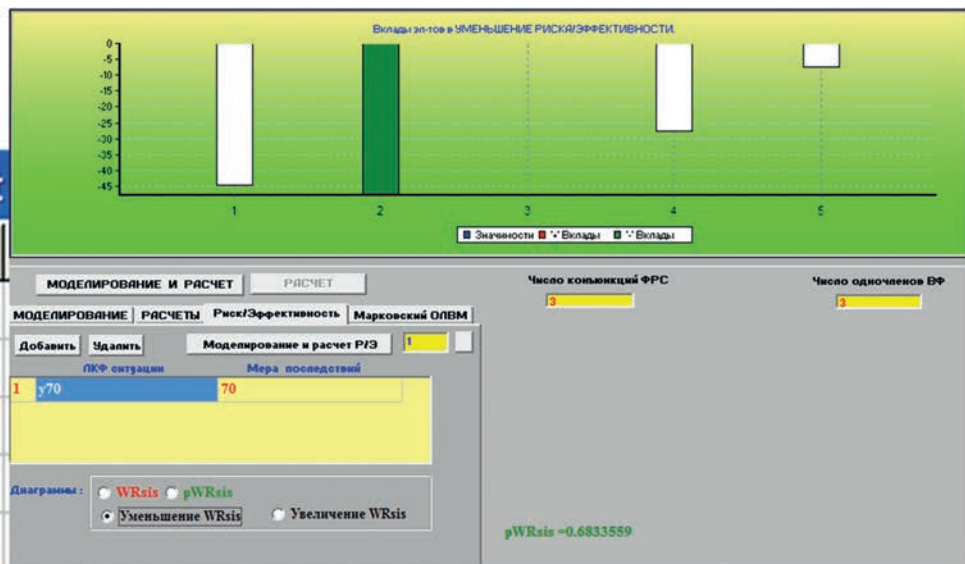
Номер вершины	Вероятность события
1	0.95
2	0.95
3	0.3
4	0.4
5	0.7



а

Файл Harel.dat

Номер вершины	Вероятность события
1	0.001
2	0.95
3	0.1
4	0.4
5	0.7



б

Рис. 5. Результаты расчетов вероятности аварии РЦАП согласно критерию $Y_{02} = y_9$ по исходным параметрам (Файл Harel.dat) при:

$$а - p_1 = 0,95; p_3 = 0,3, p_4 = 0,4, p_5 = 0,7; б - p_1 = 0,001, p_3 = 0,1, p_4 = 0,4, p_5 = 0,7$$

тий 3, 4 (поражения элементов) или 5 (возникновения поражающего фактора). Диаграмма служит доказательством, что уменьшение вероятности p_5 является наиболее эффективным решением для повышения безопасности данного устройства.

Заключение

Разработан автоматизированный расчет показателей достоверности контроля на основе ОЛВМ, позволяющий сократить время расчета по сравнению с ручным методом примерно в десять раз. Показано, что применение

ОЛВМ позволяет с помощью простых моделей производить моделирование и расчет технического риска резервированных цифро-аналоговых устройств, например блока формирования заданных углов склонения летательного аппарата.

Список литературы

1. Поленин В. И., Рябинин И. А., Свирин С. К., Гладкова И. А. Применение общего логико-вероятностного метода для анализа технических, военных организационно-функциональных систем и вооруженного противобор-



ства / Под ред. А. С. Можаяева. СПб.: СПб-региональное отделение РАЕН, 2011. 416 с.

2. Селуянов М. Н. Аналого-цифровые преобразователи с самоконтролем и их моделиро-

вание в среде *LabVIEW*. М.: Радиотехника, 2013. 264 с.

Поступила 25.01.17

Селуянов Михаил Николаевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер СКБ НТЦ «Альтаир», Публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А. А. Расплетина», г. Москва.

Область научных интересов: разработка и испытания средств автоматики и автоматизированного контроля аналого-цифровых устройств.

Implementing a common logic- and probability-based method in modeling functioning of critical systems

The author suggests using a common logic- and probability-based method for automated computation of control reliability and technical risk indicators for digital-to-analog devices designed with redundancy. The article demonstrates that employing this method frees the user from creating design equations and makes it possible to significantly reduce computation time.

Keywords: control reliability, logic- and probability-based method, technical risk, modeling.

Seluyanov Mikhail Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Leading Engineer of the Specialised Design Office, Altair Scientific and Technological Centre, Public Joint Stock company “Research and Production Corporation “Almaz” named by Academician A. A. Raspletin”, Moscow.

Science research interests: development and testing of equipment for automation and automatic control of analog-to-digital devices.