

**ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ
СИСТЕМ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

При создании отказоустойчивых радиотехнических измерительных комплексов одной из актуальных задач является обеспечение функциональной (в реальном масштабе времени) контролепригодности систем цифровой обработки сигналов (СЦОС). Сложность ее решения определяется непрерывным повышением степени интеграции элементной базы СЦОС и невозможностью четкого разделения их аппаратных и программных средств [1]. Данное обстоятельство требует пересмотра известного исходного подхода к описанию модели объектов функционального контроля СЦОС на уровне автоматного представления с целью обеспечения минимального времени восстановления правильности хода процесса обработки при минимальной структурной избыточности.

Анализ известных работ по проблеме контролепригодности радиоэлектронных систем позволяет выделить три подхода к оценке меры контролепригодности. Первый (тривиальный) подход связан с установлением частных интуитивных показателей контролепригодности, которые четкой аналитической зависимости с вероятностью успешного использования систем $P(t, \tau) = k_r(t) P(\tau)$ не имеют. Второй подход отражает стремление ввести комплексные (интегральные) показатели с учетом определенных требований к виду их представления (например, [2]). Необходимость данного подхода заключается в том, что являясь линейной комбинацией несколько частных критериев, не исключается ситуация неограниченной возможности компенсации уменьшения качества по одному частному показателю за счет увеличения качества по другому. Наиболее конструктивным является третий подход, развиваемый в работах [3; 4]. В его основе лежит оценка достоверности функ-

ционирования системы «объект контроля — средство контроля» в виде условной вероятности

$$D_{\Phi}(t) = \frac{P(\bar{\varepsilon}\bar{E})_t + P(\varepsilon E)_t}{P(\bar{\varepsilon}\bar{E})_t + P(\varepsilon E)_t + P(\bar{\varepsilon}E)_t + P(\varepsilon\bar{E})_t} = P(\bar{\varepsilon}\bar{E})_t + P(\varepsilon E)_t, \quad (1)$$

где $P(\bar{\varepsilon}\bar{E})_t$, $P(\varepsilon E)_t$, $P(\bar{\varepsilon}E)_t$, $P(\varepsilon\bar{E})_t$ — соответственно вероятности правильной (безошибочной) работы объекта контроля, обнаружения неправильной работы объекта контроля, пропуска ошибки средством контроля, принятия правильного выходного вектора объекта контроля за неправильный; ε и $\bar{\varepsilon}$, E и \bar{E} — соответственно наличие и отсутствие сигнала ошибки от средства контроля, наличие и отсутствие ошибок заданного класса в объекте контроля; t — время, в течение которого осуществляется функциональный контроль.

Данная вероятность и коэффициенты достоверности на ее основе в работах [2—4] выступают в качестве прямых показателей функциональной контролепригодности систем. Оценим объективность этого утверждения.

Из предположения, что при организации функционального контроля для наблюдения доступны лишь входы и выходы объекта контроля, а также, что объект контроля A и контрольное устройство A_k синтезированы из однотипных логических элементов и объем структуры решающего органа значительно меньше объема структуры объекта контроля A , меру структурной избыточности для обеспечения функциональной контролепригодности определим в виде коэффициента

$$k_n = \frac{\lambda_{A^o} + \lambda_{A^n} + \lambda_{A_k}}{\lambda_A} = k_{пк} + \frac{\lambda_{A^n} + \lambda_{A_k}}{\lambda_A} = k_{пк} + k_{нк}, \quad (2)$$

где λ_{A^o} , λ_{A^n} , λ_{A_k} , $k_{пк}$, $k_{нк}$ — соответственно интенсивности отказов части структуры объекта контроля, охваченного (A^o) и неохваченного (A^n) контролем, интенсивность отказов контрольного устройства, коэффициент полноты охвата контролем, коэффициент неохвата контролем.

Предполагая взаимную независимость появления ошибок в объекте A и устройстве A_k с учетом (1) получим

$$D_{\Phi}(t) = P_A(t) P_{A_k}(t) + P_{обн} [1 - P_A(t)] \text{ при } k_{пк} = 1$$

и

$$D_{\Phi}(t) = P_A(t) P_{A_k}(t) + P_{обн} [1 - P_{A^o}(t)] \text{ при } k_{пк} < 1,$$

где $P_A(t)$, $P_{A_k}(t)$, $P_{обн}$, $P_{A^o}(t)$ — соответственно вероятности безотказной работы объекта A , контрольного устройства A_k , вероятность обнаружения ошибок выбранным методом контроля, вероятность безотказной работы части объекта контроля A , охваченного контролем. При этом

$$P(\bar{\varepsilon}E)_t = [1 - P_A(t) P_{A_k}(t)] - P_{обн} [1 - P_{A^o}(t) P_{A_k}(t)].$$

Так, если $P_{обн} = 1$ и $k_{пк} = 1$, то $D_{\phi}(t) = 1$. Тогда $P_A(t) \leq D_{\phi}(t) \leq 1$. Из этого следует, что говорить об обеспечении функциональной контролепригодности имеет смысл тогда, когда

$$\Delta D_{\phi}(t) - \Delta P(t) = [D_{\phi}(t) - P_A(t)] - [P_A(t) - P_A(t)P_{A_k}(t)] > 0. \quad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость выигрыша в достоверности функционирования от величины структурной избыточности k_n при различных исходных значениях $P_A(t)$ и требуемой вероятности обнаружения ошибок $P_{обн}$.

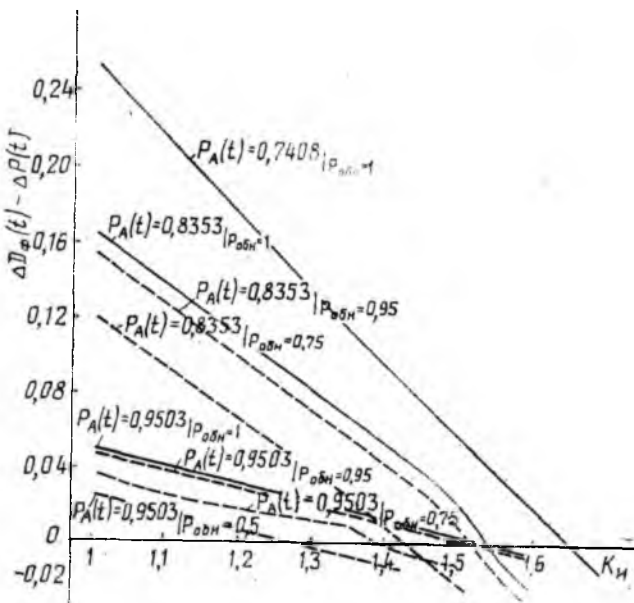


Рис. 1

ружения ошибок $P_{обн}$ (в качестве модели надежности выбрана экспоненциальная модель). Данная зависимость позволяет сделать следующие выводы.

Каждая пара $\{P_A(t), P_{обн}\}$ характеризуется своим целесообразным значением коэффициента структурной избыточности k_n^{\max} .

Чем выше достижимая вероятность обнаружения ошибок $P_{обн}$ метода контроля, тем больше степень свободы относительного выбора величины вводимой структурной избыточности.

При равной вероятности обнаружения ошибок $P_{обн}$ показателем сравнимости различных методов функционального контроля по затратам с учетом требования (3) является коэффициент относительной избыточности

$$k_{он} = (k_n^{\max} - k_n) / (k_n^{\max} - 1). \quad (4)$$

Мерой эффективности различных методов или вариантов реализации одного и того же метода функционального контроля для

заданного объекта является коэффициент эффективности контроля

$$k_{\text{ЭК}}(t) = D_{\Phi}(t) k_{\text{ОН}}.$$

Рассмотрим три примера организации функционального контроля одного и того же объекта A , который структурно можно представить в виде последовательного соединения двух узлов A_1 и A_2 .

Пример 1. Объект контроля A охвачен контролем полностью. $P_A(t) = 0,8353$, $P_{\text{ОБН}} = 1$, $k_{\text{н}}^{\text{макс}} = 1,535$, $\lambda_{A_1} t = 0,18$, $(\lambda_{A_1} t)_{\text{макс}} = 0,0963$, $k_{\text{н}} = 1,3$.

В результате расчета получим: $\lambda_{A_1} t = 0,054 < (\lambda_{A_1} t)_{\text{макс}}$, $P_{A_1}(t) = 0,9474$, $D_{\Phi_{A_1}}(t) = 0,8353 \cdot 0,9474 + 1 \cdot 0,1647 = 0,9561$, $k_{\text{ОН}} = (1,535 - 1,3)/(1,535 - 1) = 0,4393$, $k_{\text{ЭК}}(t) = 0,9561 \cdot 0,4393 = 0,4200$.

Пример 2. Объект контроля A охвачен контролем полностью путем организации автономного контроля каждого узла A_1 и A_2 . $P_A(t) = 0,8353$, $P_{A_1}(t) = P_{A_2}(t) = 0,9135$, $P_{\text{ОБН}} = 1$, $k_{\text{н}A_1}^{\text{макс}} = 1,535$, $k_{\text{н}A_2}^{\text{макс}} = k_{\text{н}A_1}^{\text{макс}} = 1,52$, $\lambda_{A_1} t = \lambda_{A_2} t = 0,0905$, $(\lambda_{A_1} t)_{\text{макс}} = (\lambda_{A_2} t)_{\text{макс}} = 0,056$, $k_{\text{н}1} = k_{\text{н}2} = 1,3$.

В результате расчета получим: $\lambda_{A_1} t = \lambda_{A_2} t = 0,027 < (\lambda_{A_1, 2} t)_{\text{макс}}$, $P_{A_1}(t) = P_{A_2}(t) = 0,9734$, $D_{\Phi_{A_1}}(t) = D_{\Phi_{A_2}}(t) = 0,9135 \cdot 0,9734 + 1 \times 0,0865 = 0,9757$, $D_{\Phi_A}(t) = D_{\Phi_{A_1}}(t) \cdot D_{\Phi_{A_2}}(t) = 0,9520$, $k_{\text{н}} = (\lambda_{A_1} t + \lambda_{A_2} t + \lambda_{A_1} t) / \lambda_{A_1} t = (0,18 + 0,027 + 0,027) / 0,18 = 1,3$, $k_{\text{ОН}} = (1,535 - 1,3) / (1,535 - 1) = 0,4393$, $k_{\text{ЭК}}(t) = 0,9520 \cdot 0,4393 = 0,4183$.

Пример 3. Объект контроля A охвачен контролем частично путем организации автономного контроля только узла A_2 . $P_A(t) = 0,8353$, $P_{\text{ОБН}} = 1$, $k_{\text{н}A_2}^{\text{макс}} = 1,58$, $P_{A_2}(t) = 0,8395$, $\lambda_{A_2} t = 0,175$, $(\lambda_{A_2} t)_{\text{макс}} = 0,1015$, $k_{\text{н}A_2} = 1,29$.

В результате расчета получим

$$\begin{aligned} \lambda_{A_2} t &= 0,0508 < (\lambda_{A_2} t)_{\text{макс}}; P_{A_2}(t) = 0,9505; D_{\Phi_{A_2}}(t) = \\ &= 0,8395 \cdot 0,9503 + 1 \cdot 0,1605 = 0,9584; D_{\Phi_A}(t) = P_{A_1}(t) D_{\Phi_{A_2}}(t) = \\ &= 0,9950 \cdot 0,9584 = 0,9584 = 0,9536, k_{\text{ОН}} = (1,58 - 1,29) / (1,58 - 1) = \\ &= 0,5, k_{\text{ЭК}}(t) = 0,9536 \cdot 0,5 = 0,4768. \end{aligned}$$

Из приведенных примеров организации функционального контроля для одного и того же объекта видно, что по величинам $D_{\Phi}(t)$ и $k_{\text{ОН}}$ непосредственно судить о различиях вариантов контроля по глубине и полноте охвата не удается. Поэтому, являясь показателями эффективности выбранного метода (методов) функционального контроля, достоверность функционирования $D_{\Phi}(t)$ и коэффициент относительной избыточности $k_{\text{ОН}}$ не могут быть определены в качестве прямых показателей функциональной контролепригодности. Кроме того, данные примеры позволяют утверждать следующее.

Поскольку результаты функционального контроля содержат информацию, позволяющую с точностью до охваченного контролем объема объекта контроля судить о месте возникновения дефекта, то прямыми показателями приспособленности объекта к функциональному контролю является размерность вектора реакции контроля v , коэффициенты полноты охвата контролем $k_{пк}$ и неохвата контролем $k_{нк}$ согласно (2).

При заданной вероятности безотказной работы объекта контроля $P_A(t)$ потенциально достижимые максимальные величины прямых показателей v , $k_{пк}$ и $k_{нк}$ определяются приемлемым (минимально возможным) уровнем абстракции модели L_{A_i} элементов структуры A_i объекта контроля A .

При выбранном методе организации функционального контроля степень отличия реальных величин показателей v , $k_{пк}$ и $k_{нк}$ от их потенциальных максимальных значений зависит от возможности разбиения всей структуры объекта контроля A на совокупность фрагментов такую, чтобы каждый из фрагментов A_i мог быть описан на заданном уровне абстракции их модели L_{A_i} . Ограничением минимального объема i -го фрагмента является предельно допустимая величина коэффициента избыточности $k_{иi}^{\max}$ при требуемой вероятности обнаружения ошибок $P_{обн}$ с учетом соблюдения условия (3).

Степень оптимальности полученных показателей обеспечения функциональной контролепригодности должна оцениваться коэффициентом неохвата контролем $k_{вк}$ и стоимостью затрат на структурную избыточность в виде коэффициента относительной избыточности $k_{он}$.

Из данных утверждений следует, что процесс обеспечения функциональной контролепригодности любой восстанавливаемой СЦОС является итеративным и в общем случае сводится к поиску такого оптимального варианта I_{opt} размещения структурной избыточности из всех возможных, для которого имеется решение вида

$$I_{opt} = \min_{k_{нк}, k_{он}} \max_{v, k_{пк}} I\{v, k_{пк}, k_{он}; P_A(t), P_{обн}, L_A\} | \Delta D_{\phi}(t) - \Delta P(t) > 0. \quad (5)$$

Исходя из (5) суть решения задачи обеспечения функциональной контролепригодности СЦОС радиотехнических измерительных комплексов сводится к следующему. На основе выбора модели описания различных иерархических уровней средств СЦОС, учитывающего тенденции развития их архитектуры и элементного базиса, необходимо разработать метод синтеза структурной избыточности и принципы ее введения такие, чтобы обеспечить экстремум прямых показателей v , $k_{пк}$, $k_{нк}$ в соответствии с (5).

Покажем наличие связи между коэффициентом готовности k_r и показателями функциональной контролепригодности v , $k_{пк}$ и $k_{нк}$. За основу описания поведения контролируемой СЦОС выберем пять возможных состояний с соответствующими вероятностями: $P_1(t)$ — состояние работоспособности; $p_2(t)$ — состояние

обнаруживаемого отказа собственными контрольными устройствами; $P_3(t)$ — состояние отказа не обнаруживаемого собственными контрольными устройствами; $P_4(t)$ — состояние двойного отказа обнаруживаемого и не обнаруживаемого собственными устройствами контроля; $P_5(t)$ — состояние обнаруживаемого отказа внешними устройствами контроля.

Граф состояний представлен на рис. 2. На графе отражено условие, что собственные контрольные устройства A_{ki} ($i=1, v$) не контролируются, а возможность появления обнаруживаемого отказа в третьем состоянии контролируемой СЦОС объясняется

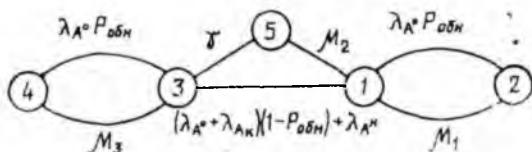


Рис. 2

тем, что в радиотехнических измерительных комплексах используется, как правило, дополнительный контроль дублированием СЦОС [5]. Через μ обозначены интенсивности восстановлений, через γ — интенсивность обнаружения отказов внешними устройствами контроля.

В силу принятых предположений матрица интенсивностей переходов состояний имеет вид

$$\begin{bmatrix} -(\lambda_A + \lambda_{A_k} - \lambda_{A_k} P_{обн}) & \lambda_{A_0} P_{обн} & (\lambda_A + \lambda_{A_k} - \lambda_{A_k} P_{обн} - \lambda_{A_0} P_{обн}) & 0 & 0 \\ \mu_1 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\lambda_{A_0} P_{обн} + \gamma) & \lambda_{A_0} P_{обн} & \gamma \\ 0 & 0 & \mu_3 & -\mu_3 & 0 \\ \mu_2 & 0 & 0 & 0 & -\mu_2 \end{bmatrix}$$

Поскольку для стационарного режима функционирования СЦОС с контролем ($t \rightarrow \infty$) $dP/dt = 0$, то решению подлежит система уравнений:

$$\begin{aligned} \mu_1 P_2 + \mu_2 P_5 - (\lambda_A + \lambda_{A_k} - \lambda_{A_k} P_{обн}) P_1 &= 0; \\ \lambda_{A_0} P_{обн} P_1 - \mu_1 P_2 &= 0; \\ (\lambda_A + \lambda_{A_k} - \lambda_{A_k} P_{обн} - \lambda_{A_0} P_{обн}) P_1 - (\lambda_A P_{обн} + \gamma) P_3 + \mu_3 P_4 &= 0; \\ \lambda_{A_0} P_{обн} P_3 - \mu_3 P_4 &= 0; \\ \gamma P_3 - \mu_2 P_5 &= 0; \\ \sum_{i=1}^5 P_i &= 1. \end{aligned} \tag{6}$$

Решая систему уравнений (6) относительно P_1 и принимая во внимание, что $\lambda_A = 1/T_0$; $\gamma = 1/T_{обн}$; $\mu_1 = \mu_3 = \beta v$, где β — параметр по-

тока восстановления на основе автоматической реконфигурации структуры СЦОС; $\mu_2 = 1/T_B$, получим

$$k_T = P_1 = \frac{\beta v}{\beta v + k_{\text{ПК}} P_{\text{обн}} + [k_{\text{ПК}} + k_{\text{НК}} - (2k_{\text{ПК}} + k_{\text{НК}} - 1) P_{\text{обн}}] \times} \cdot \\ \times [T_0/T_{\text{обн}} (\beta v + k_{\text{ПК}} P_{\text{обн}}) + \beta v T_B]$$

Если объект контроля охвачен контролем полностью и обнаруживаются все ошибки, то $k_T = \beta v / (1 + \beta v)$.

Таким образом, в условиях, когда степень интеграции элементной базы радиотехнических измерительных комплексов и сложность разделения аппаратных и программных средств их цифровых подсистем возрастают, решение задачи обеспечения функциональной контролепригодности СЦОС требует поиска нового подхода к синтезу структурной избыточности и эффективному ее размещению во всех иерархических уровнях СЦОС. При этом решение диагностической задачи должно быть максимально сведено к решению задачи контроля функционирования в реальном масштабе времени как на верхних, так и на нижних иерархических уровнях структур аппаратуры и программ.

Список литературы: 1. Гришин Ю. П., Казаринов Ю. М., Катиков В. М. Микропроцессоры в радиотехнических системах. М., 1982. 280 с. 2. Доценко Б. И. Диагностирование динамических систем. К., 1983. 159 с. 3. Щербаков Н. С., Подкопаев Б. П. Структурная теория аппаратного контроля цифровых автоматов. М., 1982. 191 с. 4. Щербаков Н. С. Достоверность работы цифровых устройств. М., 1989. 224 с. 5. Денисов А. А., Колесников Д. Н. Теория больших систем управления. М., 1982. 288 с.

Поступила в редколлегию 03.05.90