Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 18–29
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 18–29

Радиолокация и радионавигация

УДК 519.718.2 Оригинальная статья

https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-18-29

Локализация ошибок в сетях из цифровых автоматов состояний

И. В. Быстрова✉**, Б. П. Подкопаев**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ irinavalentinovn@yandex.ru

Аннотация

Введение. Для повышения достоверности выходной информации систем радиолокации и радионавигации нередко требуется локализация узлов с ошибками в режиме реального времени. Один из самых эффективных способов решения задачи локализации состоит во введении в состав систем средств функционального диагностирования. Однако для систем, имеющих большое количество функциональных узлов, на применение этого способа накладываются ограничения: сложность решения диагностической задачи и необходимость сокращения введенной аппаратной избыточности. Пути редукции этих ограничений при решении задачи локализации в упомянутых системах исследованы в настоящей статье.

Цель работы. Разработка метода синтеза средств функционального диагностирования, решающего задачу локализации ошибок систем радиолокации и радионавигации и позволяющего снизить вычислительную трудоемкость и уменьшить аппаратные затраты.

Материалы и методы. В качестве математических моделей систем приняты сети из цифровых автоматов состояний. Представлен анализ математического описания сети из цифровых автоматов состояний, а также средств функционального диагностирования каждого компонента сети. Показана возможность преобразования совокупности известных средств функционального диагностирования сети, обеспечивающая локализацию компонента сети с ошибкой при условии его единственности.

Результаты. Предложена процедура поиска аналитических выражений, задающих контрольный автомат и дискриминатор ошибок для всей сети. Рассмотрен случай, когда исходные средства функционального диагностирования компонентов заданы скалярными функциями. Полученный результат обобщен на случай векторного задания функций упомянутых средств.

Заключение. Анализ полученных результатов при помощи оценки по критерию порядка показывает, что при увеличении числа компонентов сети выигрыш по избыточности, вносимой средствами функционального диагностирования, по сравнению с исходным вариантом, существенно растет для сети, состоящей из семи компонентов. Возможность практического применения результатов исследования показана на примере решения задачи локализации для упрощенного фрагмента устройства формирования приоритетов системы взаимной навигации летательных аппаратов.

Ключевые слова: объект диагностирования, средства функционального диагностирования, сеть из автоматов, вектор состояний, локализация ошибок, контрольный автомат, дискриминатор ошибок, функция соответствия, решающая функция

Для цитирования: Быстрова И. В., Подкопаев Б. П. Локализация ошибок в сетях из цифровых автоматов состояний // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 18–29. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-18-29

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2019; принята к публикации после рецензирования 11.12.2019; опубликована онлайн 28.02.2020

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 18–29
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 18–29

Radar and Navigation

Original article

Fault Isolation in Network of State Automates

Irina V. Bystrova✉, Boris P. Podkopaev

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ irinavalentinovn@yandex.ru

Abstract

Introduction. In the paper a fault isolation problem in the devices combining digital unit by functional diagnostics methods is considered. Networks of state automates are accepted as mathematical models of the devices. Assumed, that functional diagnostics devices for each network component are preliminarily constructed in an optimal way and they consist of a control automata and of a fault discriminator of unit dimension.

Aim. To develop functional diagnostics method based on theoretical analysis allowing to decide fault isolation problem in networks of state automation and to reduce computational complexity and hardware redundancy.

Materials and methods. An analysis of mathematical description of a network of state automation and functional diagnostics devices for each network component was presented in terms of algebraic theory of functional diagnosis of dynamic systems. A possibility to transform the set of known functional diagnostics devices of the network was demonstrated. The possibility provided a localization of the network component with an error, if the component was unique.

Results. A searching procedure of the analytical equations determining supervision automata and fault discriminator for the whole network was proposed. The case when initial functional diagnostics devices for each network component were defined by scalar functions was considered. The obtained result was generalized to the case, when mentioned devices were defined by vector functions. The application of the described method was demonstrated in the example of construction functional diagnostics devices for simplified fragment of the device for forming priorities of mutual aircraft navigation system.

Conclusion. Estimation of results by an order criterion was obtained. It was established that with an increase in the number of network components, the reduction of intentioned redundancy by functional diagnostics devices compared with the original version increased significantly.

Keywords: diagnostic object, functional diagnosis devices, network of automates, state vector, fault isolation, supervision automata, fault discriminator, compliance function, decision function

For citation: Bystrova I. V., Podkopaev B. P. Fault Isolation in Network of State Automates. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 18–29. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-18-29

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 02.09.2019; accepted 11.12.2019; published online 28.02.2020

Введение. Необходимость локализации узлов с ошибками достаточно часто возникает при эксплуатации радиолокационных систем (РЛС) и радионавигационных систем (РНС), причем в свете повышения достоверности выходной информации таких систем на первое место выходит локализация таких узлов в реальном времени. Весьма эффективный способ решения этой задачи состоит во введении в состав систем средств функционального диагностирования (ФД), позволяющих избежать дорогостоящего простоя системы. Особенно целесообразно использование ФД в отказоустойчивых системах, поскольку при этом существенно снижается избыточность, обеспечивающая достижение необходимого уровня надежности.

В технической диагностике под обнаружением ошибки (fault detection) понимается определение факта наличия нештатной ситуации, а под локализацией (fault isolation) – еще и места ее проявления в диагностируемом объекте с заданной степенью точности. В обоих случаях определен перечень обнаруживаемых ошибок (неисправностей), а во втором дополнительно и условия их локализации [1]. Часто задачи обнаружения и локализации объединяют и решают совместно. В зарубежной литературе введено специальное понятие Fault Detection And Isolation (FDI). В отечественных работах по тематике ФД они часто трактуются как две разновидности общей диагностической задачи. Так, в [2] анализируются методы обнаружения и локализации отказов, основанные на использовании аналитической избыточности математической модели технической системы. В [3, 4] задача FDI для линейных дискретных систем решается с помощью наблюдателей состояний и специальных разновидностей фильтров Калмана. Вопросы локализации ошибок динамических систем освещены в [5–7].

Целью настоящей статьи является решение задачи ФД применительно к объектам диагностирования, математическая модель которых представляет собой сеть из цифровых автоматов. Устройства обработки и генерации сигналов, управления и отображения в современных РЛС и РНС, как правило, представляют собой совокупности цифровых узлов, соединенных магистралями, т. е. укладываются в рамки рассматриваемых объектов. Последние, в свою очередь, являются частным случаем сетей из динамических систем с дискретным временем, поэтому решение диагностических задач для объектов в составе РЛС и РНС следует рассматривать с позиций математической теории ФД динамических систем [8, 9].

Поскольку сеть из конечных автоматов также является конечным автоматом, решить диагностическую задачу для нее теоретически можно, используя известные методы синтеза средств ФД [9, 10]. Однако на практике такое решение наталкивается на 2 препятствия. Во-первых, надо от задания сети как совокупности заданий ее компонентов и связей между ними, в котором функция динамики (переходов) сети задана неявно, перейти к явному заданию последней, что само по себе достаточно сложно. Во-вторых, порядок (размерность) автомата, задающего сеть, будет в несколько раз больше порядков ее компонентов, и, поскольку сложность синтеза средств ФД при увеличении порядка растет, как минимум, по экспоненте, решение задачи становится невозможным из-за чрезмерных вычислительных затрат.

По указанным причинам устройства ФД приходится синтезировать индивидуально для каждого компонента, а средства ФД сети считать композицией средств ФД всех компонентов. При этом гарантируется обнаружение ошибок, распределенных по сети произвольно, в том числе и искажающих результаты работы всех компонентов одновременно. Кроме того, компоненты, в которых произошли ошибки, легко локализуются. Однако такое решение часто оказывается избыточным, поскольку вероятность появления ошибок сразу в нескольких компонентах сети мала. Поэтому основной задачей в рамках настоящей статьи является разработка метода синтеза средств ФД для сетей из автоматов состояний, позволяющего уменьшить вводимую избыточность ценой исключения из рассмотрения маловероятных ошибок применительно к упомянутым случаям. Далее предложены простые и эффективные алгоритмы для решения задачи ФД (FDI) цифровых сетей, причем при справедливости условий постановки задачи они обеспечивают минимальность решения по критерию порядка.

Объект диагностирования. Как уже отмечалось, в качестве объектов диагностирования в настоящей статье рассматриваются сети из цифровых автоматов. Для простоты считается, что компонентами сети являются автоматы без выходного логического преобразователя, т. е. автоматы состояний. В этом случае каждый i-й автомат-компонент сети задается тройкой $A_i = \left(X_i,\ Q_i,\ \boldsymbol{\delta}_i\right)$, в которой $X_i = \left\{\mathbf{x}_i\right\}$ – множество входных воздействий (входов) автомата; $Q_i = \left\{\mathbf{q}_i\right\}$ – множество его состояний; $\boldsymbol{\delta}_i = \boldsymbol{\delta}_i\left(\mathbf{x}_i,\ \mathbf{q}_i\right)$ – функция переходов (динамики) A_i, причем X_i и Q_i суть множества двоичных векторов; $\boldsymbol{\delta}_i$ – векторная булева (логическая) функция [11].

Диагностируемая сеть, образованная как композиция A_i (рис. 1), также является цифровым

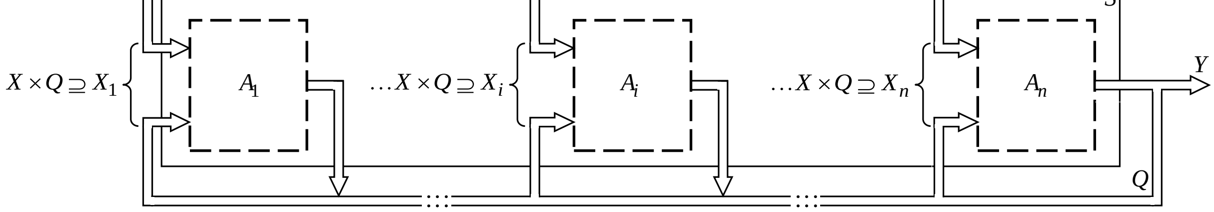

Рис. 1. Диагностируемая сеть

Fig. 1. Network under diagnostic

автоматом состояний $S=(X,\ Q,\ \boldsymbol{\delta})$. Множество состояний сети образуется декартовым произведением всех множеств состояний ее компонентов, т. е. $Q=\underset{i=1}{\overset{n}{\times}}Q_i$, где n – число компонентов S, а вектор $\mathbf{q}\in Q$ есть вектор вида $\mathbf{q}=(\mathbf{q}_1,\ \ldots,\ \mathbf{q}_i,\ \ldots,\ \mathbf{q}_n)$. Вектор входа сети $\mathbf{x}\in X$ образуется по аналогии с ее вектором состояний, но включает в себя только внешние (не зависящие от $\mathbf{q}$) компоненты $\mathbf{x}_i$, поэтому мощность множества X меньше мощности декартова произведения $\underset{i=1}{\overset{n}{\times}}X_i$. Векторная булева функция переходов сети является композицией всех функций переходов компонентов: $\boldsymbol{\delta}=(\boldsymbol{\delta}_1,\ldots,\boldsymbol{\delta}_i,\ldots,\boldsymbol{\delta}_n)$ [12].

Постановка задачи диагностирования. Положим, что для каждого автомата A_i сети S в соответствии с базовой формой ФД [13] оптимальным образом построены средства диагностирования. В их структуру входят:

– объект диагностирования $A_i=(X_i,\ Q_i,\ \boldsymbol{\delta}_i)$;

– контрольный автомат $A_{\text{К}i}=(X_{\text{К}i},\ Q_{\text{К}i},\ \boldsymbol{\delta}_{\text{К}i})$, который функционирует синхронно с автоматом A_i;

– безынерционный функциональный преобразователь, называемый дискриминатором ошибок D_i. Последний состоит из двух узлов: вычислителя векторной функции соответствия $\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)$ и устройства сравнения $\otimes$, на выходе которого формируется бинарная решающая функция $\varepsilon_i[\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i),\ \mathbf{q}_{\text{К}i}]$ (рис. 2).

Контрольный автомат $A_{\text{К}i}=(X_{\text{К}i},\ Q_{\text{К}i},\ \boldsymbol{\delta}_{\text{К}i})$ отслеживает состояния исходного автомата $A_i=(X_i,\ Q_i,\ \boldsymbol{\delta}_i)$ с точностью, достаточной для обнаружения в последнем ошибок заданного класса E_i, причем входом $A_{\text{К}i}$ является композиция из элементов $\mathbf{x}_i\in X_i$ и $\mathbf{q}_i\in Q_i$.

Рис. 2. Устройство сравнения

Fig. 2. Comparison device

Размерность векторов $\mathbf{q}_{\text{К}i}\in Q_{\text{К}i}$ не превышает размерности $\mathbf{q}_i\in Q_i$, а множество входов контрольного автомата $A_{\text{К}i}$ есть подмножество декартова произведения $X_i\times Q_i$, в котором $X_i\subseteq X\times Q$, тогда $X_{\text{К}i}\subseteq X\times Q\times Q_i$, т. е. в общем случае функция переходов $\boldsymbol{\delta}_{\text{К}i}$ кроме $\mathbf{q}_{\text{К}i}$ зависит еще от трех внешних по отношению к $A_{\text{К}i}$ аргументов: $\mathbf{x}$, $\mathbf{q}$ и $\mathbf{q}_i$.

Дискриминатор ошибок D_i есть логическая схема, в которой вычисляется функция соответствия $\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)$, значение которой при отсутствии ошибок в A_i и $A_{\text{К}i}$ всегда равно значению $\mathbf{q}_{\text{К}i}\in Q_{\text{К}i}$.

При появлении ошибки заданного класса упомянутое равенство нарушается, что позволяет ее обнаружить. Для этого в устройстве сравнения генерируется некоторая бинарная решающая функция $\varepsilon_i[\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i),\mathbf{q}_{\text{К}i}]$, значение которой при несправедливости соотношения $\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)=\mathbf{q}_{\text{К}i}$ инвертируется. Обычно считают, что при отсутствии ошибок она должна равняться нулю, а при их появлении – единице.

Поскольку средства ФД построены для каждого компонента сети индивидуально, обнаружение ошибок сопровождается их локализацией с точностью до компонента сети, причем ошибки во всех компонентах могут быть локализованы одновременно.

Рассматриваемая сеть S, как и ее компоненты A_i, представляет собой цифровой автомат состояний, поэтому решение задачи ФД для нее тоже можно найти в базовой форме. Последняя, по аналогии с предыдущей (рис. 2), должна включать в себя объект диагностирования S, контрольную систему (автомат) $S_{\text{К}}$ и дискриминатор ошибок D. Сеть S как состоящая из всех A_i, определена, $S_{\text{К}}$ и D нужно синтезировать, преобразуя совокупности известных $A_{\text{К}i}$ и D_i в $S_{\text{К}}$ и D соответственно, причем способ преобразования существенно зависит от класса ошибок, подлежащих обнаружению и локализации.

Отметим, что упомянутый класс не может быть шире объединения классов ошибок, локализуемых с помощью $A_{\text{К}i}$ и D_i, причем уменьшение затрат на ФД может произойти только за счет его сужения.

Исходя из изложенного, задачу, рассматриваемую в настоящей статье, можно поставить следующим образом.

Пусть n цифровых автоматов состояний A_i образуют сеть S и для каждого автомата сети оптимальным образом решена задача ФД в базовой форме, т. е. синтезированы совокупности контрольных автоматов $A_{\text{K}i}$ и дискриминаторов ошибок D_i. Построить в той же форме средства ФД для всей сети так, чтобы входящая в нее контрольная система S_{K} имела минимальный порядок и совместно с дискриминатором ошибок D обеспечивала обнаружение и локализацию ошибок в произвольном, но единственном компоненте сети.

Решение задачи ФД. Для решения поставленной задачи нужно найти 3 логические функции, определяющие вид контрольной системы S_{K} и дискриминатора ошибок D. Во-первых, функцию соответствия $\mathbf{r}(\mathbf{q})$. В общем случае она является векторной и, с одной стороны, синтезируется исходя из класса обнаруживаемых ошибок, а с другой – задает вектор состояния S_{K}, так как при отсутствии ошибок в сети $\mathbf{q}_{\text{K}} = \mathbf{r}(\mathbf{q})$. Во-вторых, решающую функцию $\boldsymbol{\varepsilon}\left[\mathbf{r}(\mathbf{q}), \mathbf{q}_{\text{K}}\right]$, вид которой характеризует способ фиксации ошибок и глубину их локализации. При обнаружении ошибок она может быть скалярной даже в случае многократных ошибок [14], локализация с необходимостью требует ее векторности. В-третьих, также в общем случае векторную, функцию переходов $\boldsymbol{\delta}_{\text{K}}(\mathbf{x}_{\text{K}}, \mathbf{q}_{\text{K}})$ системы S_{K}. Первые две функции определяют дискриминатор ошибок D_i, вторая и третья – контрольную систему S_{K}.

Прежде всего, преобразуя известную совокупность решающих функций для A_i, найдем решающую функцию $\boldsymbol{\varepsilon}$. Она зависит от вектора состояний $\mathbf{q}_{\text{K}}$ и функции соответствия $\mathbf{r}(\mathbf{q})$, причем последняя должна явным образом выделяться из выражения для $\boldsymbol{\varepsilon}$. Для этого необходимо представить $\boldsymbol{\varepsilon}$ в виде разделимой декомпозиции по $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ и $\mathbf{q}_{\text{K}}$, которую при решении задач ФД сетей можно получить только с помощью линейных преобразований [14, 15].

Нужное преобразование найдем, используя условие единственности компонента сети с ошибкой. Из него следует, что исходная векторная решающая функция $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}} = (\boldsymbol{\varepsilon}_1, \ldots, \boldsymbol{\varepsilon}_i, \ldots, \boldsymbol{\varepsilon}_n)$, компоненты которой суть решающие функции всех $A_{\text{K}i}$, равна нулевому вектору при отсутствии ошибок и вектору с единичной нормой Хэмминга [16] при их наличии, причем число последних равно n.

Образуем из нулей и единиц матрицу G с размерами $m \times n$, где $m =]\log_2(n+1)[$ – ближайшее к $\log_2(n+1)$ большее целое число, так, чтобы ее строки представляли собой последовательно идущие m-разрядные двоичные векторы (числа) от 1 до m, и найдем произведение $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}} G$. В нем значения m-разрядного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ и n-разрядного $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}}$ связаны взаимно-однозначно, причем при единичной норме вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}}$ значение двоичного вектора $\boldsymbol{\varepsilon}$ совпадает с номером единичного разряда $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}}$. Если в сети S ошибок нет, то $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}} = 0$ и вектор $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{И}} G$ также равен нулю, что является признаком нормальной работы системы.

Введенное преобразование позволяет локализовать автомат с ошибкой в сети при минимальной размерности фиксирующего их вектора и определяет искомую векторную решающую функцию как результат умножения векторного аргумента, образованного композицией скалярных функций ε_i, на введенную матрицу G:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \ \ldots, \ \varepsilon_i, \ \ldots, \ \varepsilon_n) G, \tag{1}$$

Соотношение (1), задавая решающую функцию через линейное преобразование, тем не менее, разделимой декомпозицией не является. Рассмотрим возможности изменения его формы. Для начала, положим, что аргументы всех решающих функций ε_i скалярны, т. е.

$$\varepsilon_i\left[\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i), \ \mathbf{q}_{\text{K}i}\right] = \varepsilon_i\left[r_i(\mathbf{q}_i), \ q_{\text{K}i}\right].$$

К примеру, такая ситуация наблюдается, если во всех A_i обнаруживаются только однократные ошибки. Поскольку в скалярном случае $\varepsilon_i\left[r_i(\mathbf{q}_i), \ q_{\text{K}i}\right] = r_i(\mathbf{q}_i) \oplus q_{\text{K}i}$ [14], простая подстановка трансформирует (1) в

$$\begin{gathered}\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \ \ldots, \ \varepsilon_i, \ \ldots, \ \varepsilon_n) G = \\ = \left[r_1(\mathbf{q}_1) \oplus q_{\text{K}1}, \ \ldots, \ r_i(\mathbf{q}_i) \oplus q_{\text{K}i}, G, \ldots \right. \\ \left. \ldots, \ r_n(\mathbf{q}_n) \oplus q_{\text{K}n}\right] G,\end{gathered}$$

что после учета ассоциативности суммирования по модулю 2 и линейности матричного умножения приведет к заданию решающей функции как покомпонентной суммы двух векторов вида

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \left[r_1(\mathbf{q}_1),\ \ldots,\ r_i(\mathbf{q}_i),\ \ldots,\ r_n(\mathbf{q}_n)\right]G \oplus \\ \oplus \left(q_{\text{К}1},\ \ldots,\ q_{\text{К}i},\ \ldots,\ q_{\text{К}n}\right)G. \quad (2)$$

Полученная сумма есть разделимая декомпозиция, из которой легко выделяются вектор состояния $\mathbf{q}_\text{К}$ и функция соответствия $\mathbf{r}(\mathbf{q})$:

$$\begin{cases} \mathbf{q}_\text{К} = \left(q_{\text{К}1},\ \ldots,\ q_{\text{К}i},\ \ldots,\ q_{\text{К}n}\right)G; \\ \mathbf{r}(\mathbf{q}) = \left[r_1(\mathbf{q}_1),\ \ldots,\ r_i(\mathbf{q}_i),\ \ldots,\ r_n(\mathbf{q}_n)\right]G. \end{cases} \quad (3)$$

При отсутствии ошибок в S и $S_\text{К}$ имеем $\mathbf{q}_\text{К} = \mathbf{r}(\mathbf{q})$. Появление ошибок это равенство нарушает, что и позволяет их обнаружить и локализовать.

Для полного задания контрольной системы $S_\text{К}$ осталось, используя совокупность функций переходов автоматов $A_{\text{К}i}$, найти функцию переходов $\boldsymbol{\delta}_\text{К}\left(\mathbf{x}_\text{К},\ \mathbf{q}_\text{К}\right)$. Обозначим для компактности вектор, компоненты которого суть функции переходов этих автоматов, символом $\left\langle \boldsymbol{\delta}_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}i},\ \mathbf{q}_{\text{К}i}\right)\right\rangle$. При скалярности всех функций соответствия $r_i(\mathbf{q}_i)$ все компоненты этого вектора также скалярны: $\boldsymbol{\delta}_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}i},\ q_{\text{К}i}\right) = \delta_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}i},\ q_{\text{К}i}\right)$. Поскольку состояния и функция переходов автомата $A_{\text{К}i}$ в двух соседних тактах t и t^* связаны равенством $q_{\text{К}it^*} = \delta_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}it},\ q_{\text{К}it}\right)$, из (3) следует, что в такте t^* вектор $\mathbf{q}_{\text{К}t^*} = \left\langle \delta_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}it},\ q_{\text{К}it}\right)\right\rangle G$ и далее

$$\boldsymbol{\delta}_\text{К}\left(\mathbf{x}_\text{К},\ \mathbf{q}_\text{К}\right) = \left\langle \delta_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}i},\ q_{\text{К}i}\right)\right\rangle G = \\ = \left[\delta_{\text{К}1}\left(\mathbf{x}_{\text{К}1},\ q_{\text{К}1}\right),\ \ldots,\ \delta_{\text{К}i}\left(\mathbf{x}_{\text{К}i},\ q_{\text{К}i}\right), \ldots \right. \\ \left. \ldots,\ \delta_{\text{К}n}\left(\mathbf{x}_{\text{К}n},\ q_{\text{К}n}\right)\right]G. \quad (4)$$

Полученное выражение задает функцию переходов $S_\text{К}$, однако оно неконструктивно, поскольку содержит в правой части состояния $A_{\text{К}i}$, от которых в окончательном решении нужно избавиться. Для этого, используя справедливое при отсутствии ошибок равенство $r_i(\mathbf{q}_i) = q_{\text{К}i}$, заменим в (4) состояния $q_{\text{К}i}$ функциями соответствия $r_i(\mathbf{q}_i)$ и получим $\boldsymbol{\delta}_\text{К}\left(\mathbf{x}_\text{К},\ \mathbf{q}_\text{К}\right) = \left\langle \boldsymbol{\delta}_{\text{К}i}\left[\mathbf{x}_{\text{К}i},\ r_i(q_i)\right]\right\rangle G$. Правая часть этого равенства не зависит от $\mathbf{q}_\text{К}$, что определяет реализацию системы $S_\text{К}$ в форме логической задержки [8] и позволяет окончательно найти ее функцию переходов как

$$\delta_\text{К}\left(x_\text{К}\right) = \left\langle \delta_{\text{К}i}\left[x_{\text{К}i},\ r_i(q_i)\right]\right\rangle G = \\ = \left\{\delta_{\text{К}i}\left[x_{\text{К}i},\ r_i(q_i)\right],\ \ldots,\ \delta_{\text{К}1}\left[x_{\text{К}1},\ r_1(q_1)\right], \ldots \right. \\ \left. \ldots,\ \delta_{\text{К}n}\left[x_{\text{К}n},\ r_n(q_n)\right]\right\}G. \quad (5)$$

Вектор $\mathbf{x}_\text{К}$ в (5) составной. В общем случае он включает в себя кроме компонентов вектора входа системы S компоненты как ее вектора состояний, так и векторов состояний всех A_i. Это объясняется тем, что из $X_{\text{К}i} \subseteq X \times Q \times Q_i$ следует $X_\text{К} \subseteq X \times Q \times \left(\mathop{\times}\limits_{i=1}^{n} Q_i\right)$, а $\mathbf{x}_\text{К} \in X_\text{К}$.

Таким образом, поскольку все 3 функции, задающие контрольную систему $S_\text{К}$, и дискриминатор ошибок D определены соотношениями (2), (3) и (5), а способ формирования входящей в них матрицы G указан, поставленная задача применительно к случаю скалярности всех функций соответствия для компонентов сети S решена. Контрольная система $S_\text{К}$ реализуема в форме логической задержки минимальным по критерию порядка образом. Технически ее построение сводится к решению задачи логического синтеза стандартными методами [9, 10].

При векторности функций соответствия $r_i(\mathbf{q}_i)$ для решения задачи локализации ошибок в сети S предложенный ранее способ синтеза $S_\text{К}$ следует изменить по аналогии с примененной в [14] модификацией процедуры построения средств ФД для обнаружения ошибок. Необходимые изменения найдем, предположив, что размерность всех функций соответствия одинакова и равна p. В этом случае каждая из них представляет собой вектор, компоненты которого суть скалярные функции:

$$\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i) = \left[r_{i1}(\mathbf{q}_i), \ldots, r_{ij}(\mathbf{q}_i), \ldots, r_{ip}(\mathbf{q}_i)\right],$$

а вектор состояний $A_{\text{К}i}$ имеет вид

$$\mathbf{q}_{\text{К}i} = \left[q_{\text{К}i1},\ \ldots,\ q_{\text{К}ij},\ \ldots,\ q_{\text{К}ip}\right].$$

При отсутствии ошибок эти векторы почленно равны:

$$\mathbf{q}_{\text{К}i} = \mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i) = \left[q_{\text{К}i1} = r_{i1}(\mathbf{q}_i), \ldots \right. \\ \left. \ldots,\ q_{\text{К}ij} = r_{ij}(\mathbf{q}_i),\ \ldots,\ q_{\text{К}ip} = r_{ip}(\mathbf{q}_i)\right].$$

Тогда решающая функция имеет вид логической суммы (операции "ИЛИ") $\varepsilon_i = \bigvee_{j=1}^{p} \varepsilon_{ij}$, где $\varepsilon_{ij} = r_{ij}(\mathbf{q}_i) \oplus q_{\text{К}ij}$.

Как и ранее, исходная векторная решающая функция размерности *n* для сети *S* определяется выражением $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}} = (\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_i, \ldots, \varepsilon_n)$, подставив в которое логические суммы, задающие ε_i, получим

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}} = \left(\bigvee_{j=1}^{p} \varepsilon_{1j}, \ \ldots, \ \bigvee_{j=1}^{p} \varepsilon_{ij}, \ \ldots, \ \bigvee_{j=1}^{p} \varepsilon_{nj} \right). \tag{6}$$

Образовав вспомогательные векторные функции вида $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}j} = (\varepsilon_{1j}, \ldots, \varepsilon_{ij}, \ldots, \varepsilon_{nj})$, можно убедиться, что заданная соотношением (6) решающая функция есть покомпонентная логическая сумма всех $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}j}$. Очевидно, что каждая $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}j}$ обеспечивает обнаружение и локализацию некоторой части ошибок в *S* (подкласс E_j), $(q_{\text{К}1j}, \ldots, q_{\text{К}ij}, \ldots, q_{\text{К}nj})G$, а их совокупность – всех ошибок заданного класса $\mathrm{E} \bigcup_{j=1}^{p} \mathrm{E}_j$.

Выберем некоторую функцию $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}j}$ и решим задачу локализации применительно к ошибкам из подкласса E_j, считая, что они происходят в одном и только одном компоненте S. Поскольку все ее компоненты $\varepsilon_{ij} = r_{ij}(\mathbf{q}_i) \oplus q_{\text{К}ij}$ формируются как суммы скаляров, искомое решение не отличается от полученного ранее, и средства ФД в виде контрольной подсистемы $S_{\text{К}j}$ с дискриминатором ошибок D_j определяются соотношениями (2), (3) и (5):

$$\boldsymbol{\varepsilon}_j = \left[r_{1j}(\mathbf{q}_1), \ \ldots, \ r_{ij}(\mathbf{q}_i), \ \ldots, \ r_{nj}(\mathbf{q}_n) \right] G \oplus \oplus \left(q_{\text{К}1j}, \ \ldots, \ q_{\text{К}ij}, \ \ldots, \ q_{\text{К}nj} \right) G;$$

$$\mathbf{q}_{\text{К}j} = \left(q_{\text{К}1j}, \ \ldots, \ q_{\text{К}ij}, \ \ldots, \ q_{\text{К}nj} \right) G;$$

$$r_j(\mathbf{q}) = \left[r_{1j}(\mathbf{q}_1), \ \ldots, \ r_{ij}(\mathbf{q}_i), \ \ldots, \ r_{nj}(\mathbf{q}_n) \right] G;$$

$$\delta_{\text{К}j}(x_{\text{К}}) = \left\langle \delta_{\text{К}ij}\left[x_{\text{К}i}, \ r_{ij}(q_i) \right] \right\rangle G = = \left\{ \delta_{\text{К}1j}\left[x_{\text{К}1}, \ r_{1j}(q_1) \right], \ \ldots, \ \delta_{\text{К}ij}\left[x_{\text{К}i}, \ r_{ij}(q_i) \right], \ldots \ldots, \ \delta_{\text{К}nj}\left[x_{\text{К}n}, \ r_{nj}(q_n) \right] \right\} G.$$

При образовании решающей функции для всей сети *S* следует учесть, что подклассы ошибок, образующие Е, могут пересекаться, поскольку при векторности функций соответствия ошибка в некотором компоненте сети A_i может нарушить равенство $\mathbf{q}_{\text{К}i} = \mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)$ сразу в нескольких компонентах, т. е. под знаком *i*-й логической суммы в (6) может быть несколько единичных слагаемых. Это приведет к появлению среди $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{и}j}$ нескольких функций, значения которых при данной ошибке равны, а индексы различны. Тогда и среди $\boldsymbol{\varepsilon}_j$ таких функций будет несколько, что исключает возможность использования при формировании искомой решающей функции их покомпонентного суммирования по модулю 2, так как результатом такого суммирования может быть нулевой вектор, соответствующий отсутствию ошибок.

В этом случае следует использовать логическое суммирование (операцию "ИЛИ"). Тогда искомая решающая функция принимает следующий вид:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \bigvee_{j=1}^{p} \boldsymbol{\varepsilon}_j = = \bigvee_{j=1}^{p} \left\{ \left[r_{1j}(\mathbf{q}_1), \ \ldots, \ r_{ij}(\mathbf{q}_i), \ \ldots, \ r_{nj}(\mathbf{q}_n) \right] G \oplus \oplus \left(q_{\text{К}1j}, \ \ldots, \ q_{\text{К}ij}, \ \ldots, \ q_{\text{К}nj} \right) G \right\}. \tag{7}$$

Поскольку (7) не является разделимой по компонентам $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ и $\mathbf{q}_{\text{К}}$, функция соответствия $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ образуется как композиция всех функций $\mathbf{r}_j(\mathbf{q})$ и состоит из *pm* скалярных компонентов:

$$\mathbf{r}(\mathbf{q}) = \left\{ \left[r_{11}(\mathbf{q}_1), \ \ldots, \ r_{n1}(\mathbf{q}_n) \right] G, \ldots \ldots, \ \left[r_{1j}(\mathbf{q}_1), \ \ldots, \ r_{nj}(\mathbf{q}_n) \right] G, \ldots \ldots, \ \left[r_{1p}(\mathbf{q}_1), \ \ldots, \ r_{np}(\mathbf{q}_n) \right] G \right\}. \tag{8}$$

Исходя из равенства $\mathbf{q}_{\text{К}} = \mathbf{r}(\mathbf{q}_i)$, получим выражения для $\mathbf{q}_{\text{К}}$ и $\boldsymbol{\delta}_{\text{К}}(\mathbf{x}_{\text{К}})$:

$$\mathbf{q}_{\text{К}} = \left[\left(q_{\text{К}11}, \ \ldots, \ q_{\text{К}i1}, \ \ldots, \ q_{\text{К}n1} \right) G, \ldots \ldots, \ \left(q_{\text{К}1j}, \ \ldots, \ q_{\text{К}ij}, \ \ldots, \ q_{\text{К}nj} \right) G, \ldots \ldots, \ \left(q_{\text{К}1p}, \ \ldots, \ q_{\text{К}ip}, \ \ldots, \ q_{\text{К}np} \right) G \right]; \tag{9}$$

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{К}}(\mathbf{x}_{\text{К}}) = \left\{ \delta_{\text{К}11}\left[\mathbf{x}_{\text{К}}, \ r_{11}(\mathbf{q}_1) \right], \ldots \ldots, \ \delta_{\text{К}n1}\left[\mathbf{x}_{\text{К}n}, \ r_{n1}(\mathbf{q}_n) \right] \right\} G, \ldots \ldots, \ \left\{ \delta_{\text{К}1j}\left[\mathbf{x}_{\text{К}1}, \ r_{1j}(\mathbf{q}_1) \right], \ldots \ldots, \ \delta_{\text{К}nj}\left[\mathbf{x}_{\text{К}n}, \ r_{nj}(\mathbf{q}_n) \right] \right\} G, \ldots \ldots, \ \left\{ \delta_{\text{К}1p}\left[\mathbf{x}_{\text{К}1} \ r_{1p}(\mathbf{q}_1) \right], \ldots \ldots \ \delta_{\text{К}np}\left[\mathbf{x}_{\text{К}n}, \ r_{np}(\mathbf{q}_n) \right] \right\} G. \tag{10}$$

Размерности вектора состояний $\mathbf{q}_\text{K}$ и функции переходов $\boldsymbol{\delta}_\text{K}(\mathbf{x}_\text{K})$ совпадают с размерностью функции соответствия $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ и равны $pm = p\,]\log_2(n+1)[$.

Соотношения (7)–(10) полностью определяют контрольную систему S_K и дискриминатор ошибок $\boldsymbol{D}$ для сети S в случае равной размерности векторных функций соответствия ее компонентов. Нетрудно убедиться, что при единичной размерности этих функций (функции скалярны) (7) и (10) принимают вид соотношений (2) и (5) соответственно, а (8) и (9) преобразуются в правую и левую части соотношения (3).

Если размерности функций соответствия $\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)$ не равны, то для синтеза средств ФД полученные соотношения можно использовать при условии дополнения функций меньшей размерности нулевыми компонентами до максимального значения, при этом соответствующие векторы состояний $\mathbf{q}_{\text{K}j}$ также дополняются нулями.

Оценка результатов. Оценим полученные результаты, сравнив сложность исходных средств ФД со средствами, полученными в результате предложенных преобразований. Для оценки используем критерий порядка [17], значение которого в рассматриваемом случае равно суммарной размерности векторов состояний всех $A_{\text{K}i}$ для исходного варианта и размерности $\mathbf{q}_\text{K}$ для преобразованного. При скалярности функций соответствия $\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)$ первая равна n, а вторая – $]\log_2(n+1)[$, т. е. выигрыш по порядку

$$\eta = n/]\log_2(n+1)[. \tag{11}$$

Оценка (11) справедлива и тогда, когда функции соответствия являются векторными, но имеют одинаковую размерность p, поскольку в этом случае размерности всех векторов состояний увеличиваются в p раз, т. е. числитель и знаменатель (10) растут пропорционально и значение η не меняется. В случае разной размерности функций соответствия $\mathbf{r}_i(\mathbf{q}_i)$ вычисление значения η также сложностью не отличается, но компактной формулы вида (11) для этого нет.

Анализируя (11) можно сделать вывод, что представленный в настоящей статье метод синтеза средств ФД для сети из автоматов состояний с функциями соответствия одинаковой размерности дает выигрыш, если число ее компонентов $n \ge 3$. С увеличением числа компонентов сети выигрыш быстро, но не монотонно, растет: η имеет локальные максимумы при $n = 2^k - 1$ и минимумы при $n = 2^k$ ($k \ge 2$ – целое число). В случае различной размерности функций соответствия этот рост сохраняется, но его интенсивность зависит от распределения размерностей по ним. В худшем случае, когда лишь одна функция имеет размерность p, а остальные – 1, выигрыш наблюдается только при $p \ge]\log_2(n+1)[$.

Пример. Рассмотрим упрощенный фрагмент устройства формирования приоритетов системы взаимной навигации летательных аппаратов. Фрагмент представляет собой сеть с индивидуальными средствами ФД компонентов, операционная часть которого состоит из двух двоичных счетчиков и одного регистра сдвига, а диагностическая – из пяти триггеров типа D с вычислителями функций соответствия и решающих функций (рис. 3). Упрощение фрагмента состоит в уменьшении разрядности операционной части до уровня, позволяющего получить его компактное представление.

Средства ФД обеспечивают обнаружение и локализацию однократных ошибок: арифметических в счетчиках и групповых в регистре. Используя описанную методику, преобразуем их в общесетевые средства ФД минимального порядка, гарантирующие обнаружение и локализацию тех же ошибок при условии их наличия только в одном компоненте сети.

1. В рассматриваемом случае $n = 3$ и $m =]\log_2(n+1)[= 2$, а преобразующая матрица

$$G = \begin{Vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{Vmatrix}.$$

2. Функции $\mathbf{r}_1(\mathbf{q}_1) = (r_{11},\ r_{12})$ и $\mathbf{r}_2(\mathbf{q}_2) = (r_{21},\ r_{22})$ – векторные, а $r_3(\mathbf{q}_3) = r_{31}$ – скалярная (рис. 3), поэтому искомая функция соответствия сети вычисляется по формуле (8) после добавления к r_{31} нулевого компонента:

$$\mathbf{r}(\mathbf{q}) = \left[(r_{11},\ r_{21},\ r_{31})G,\ (r_{12},\ r_{22},\ 0)G\right] =$$
$$= \left(r_1 = r_{21} \oplus r_{31},\ r_2 = r_{11} \oplus r_{31},\ r_3 = r_{22},\ r_4 = r_{12}\right).$$

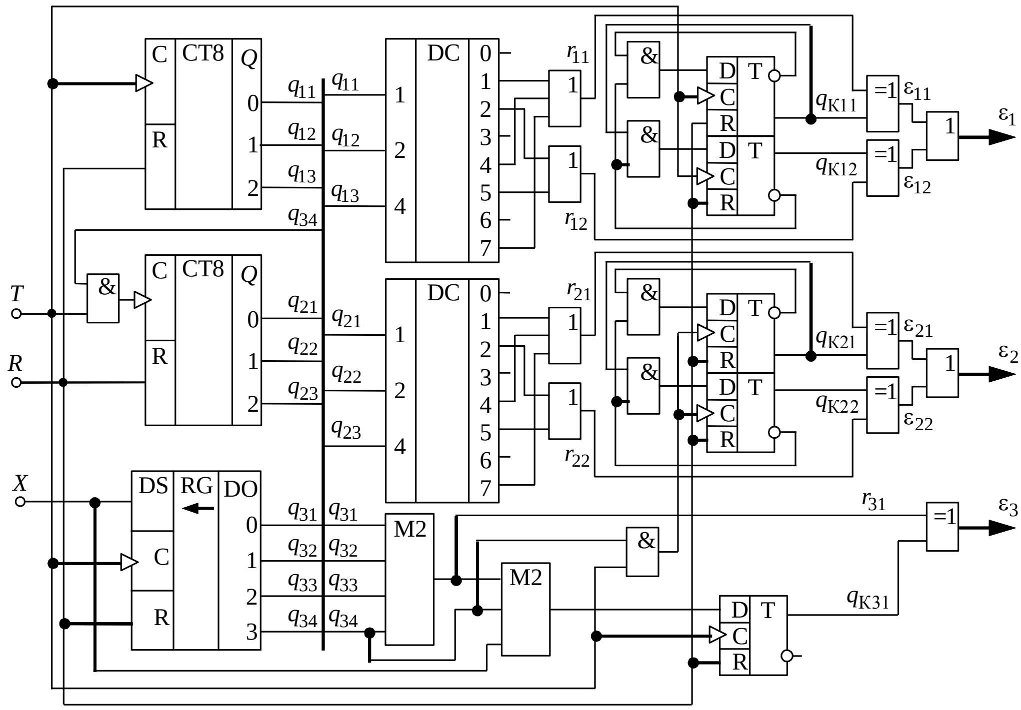

Рис. 3. Упрощенная принципиальная схема фрагмента формирователя приоритетов системы взаимной навигации летательных аппаратов

Fig. 3. A simplified schematic diagram of the fragment of priority driver of the aircraft mutual navigation system

3. В соответствии с (9)

$$\mathbf{q}_{\text{K}} = \left(q_{\text{K}1} = q_{\text{K}21} \oplus q_{\text{K}31},\ q_{\text{K}2} = q_{\text{K}11} \oplus q_{\text{K}31},\ q_{\text{K}3} = q_{\text{K}22},\ q_{\text{K}4} = q_{\text{K}12}\right),$$

т. е. вектор состояния $\mathbf{q}_{\text{K}}$ есть четырехразрядный двоичный вектор.

4. Для реализации A_{K} в форме логической задержки, используя (10) и опустив аргументы функций переходов, получим:

$$\boldsymbol{\delta}_{\text{K}} = \left(\delta_{\text{K}1} = \delta_{\text{K}21} \oplus \delta_{\text{K}31},\ \delta_{\text{K}2} = \delta_{\text{K}11} \oplus \delta_{\text{K}31},\ \delta_{\text{K}3} = \delta_{\text{K}22},\ \delta_{\text{K}4} = \delta_{\text{K}12}\right).$$

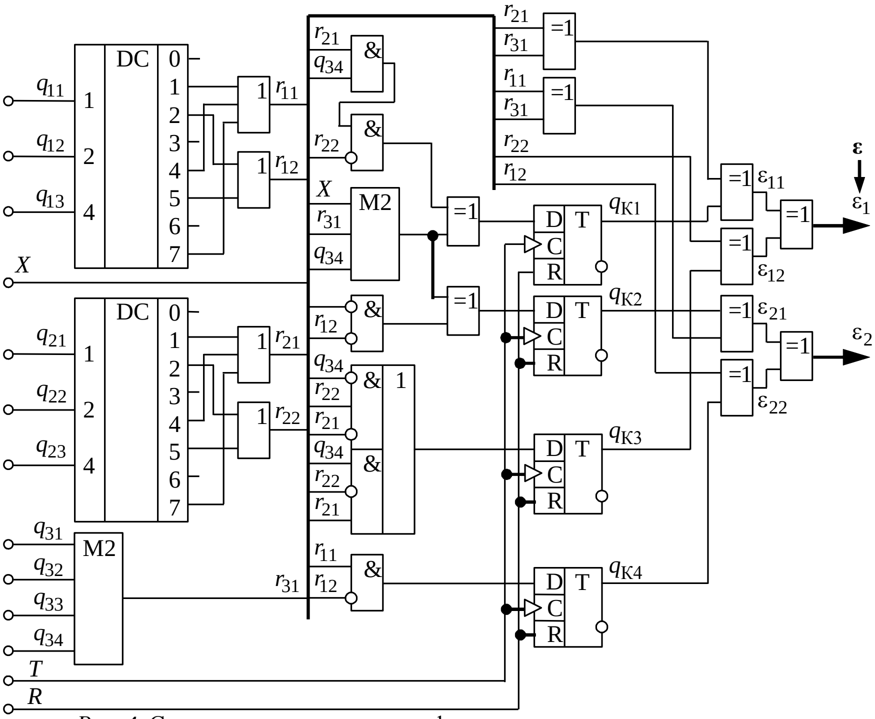

Рис. 4. Синтезированные средства функционального диагностирования

Fig. 4. Synthesized equipment of the functional diagnostics

Определив $\delta_{\text{К}ij}$ посредством анализа рис. 3, с учетом равенства $q_{\text{К}ij} = r_{ij}$ окончательно получим:

$$\begin{gathered}\boldsymbol{\delta}_{\text{К}} = \big[\delta_{\text{К}1} = \bar{r}_{22}(q_{34} \oplus r_{21}) \oplus X \oplus r_{31} \oplus q_{34}, \\ \delta_{\text{К}2} = \bar{r}_{11}\bar{r}_{12} \oplus X \oplus r_{31} \oplus q_{34}, \\ \delta_{\text{К}3} = \bar{q}_{34} r_{22} \bar{r}_{21} \vee q_{34} \bar{r}_{22} r_{21},\ \delta_{\text{К}4} = r_{11}\bar{r}_{12}\big].\end{gathered}$$

5. Векторная решающая функция определяется в соответствии с (7):

$$\begin{gathered}\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \\ = \big[(r_{21} \oplus r_{31} \oplus q_{\text{К}21} \oplus q_{\text{К}31}) \vee (r_{22} \oplus q_{\text{К}22}), \\ (r_{11} \oplus r_{31} \oplus q_{\text{К}11} \oplus q_{\text{К}31}) \vee (r_{12} \oplus q_{\text{К}12})\big] = \\ = \big[(r_1 \oplus q_{\text{К}1}) \vee (r_3 \oplus q_{\text{К}3}), \\ (r_2 \oplus q_{\text{К}2}) \vee (r_4 \oplus q_{\text{К}4})\big] = \\ = (\varepsilon_{11} \vee \varepsilon_{12},\ \varepsilon_{21} \vee \varepsilon_{22}).\end{gathered}$$

Таким образом, все функции, определяющие $S_{\text{К}}$ и D, получены, что позволяет с помощью стандартных методов синтеза цифровых устройств построить искомые средства ФД (рис. 4).

Сравнение синтезированных с помощью предложенного метода средств ФД (рис. 4) с исходными (рис. 3) показывает, что при практически одинаковых затратах на логическую часть выигрыш первых по порядку (памяти) составляет 25 %. Это относительно небольшое значение подтверждает справедливость приведенных ранее оценок эффективности метода и объясняется малой размерностью сети S $(n = 3)$ и разной размерностью функций соответствия компонентов сети.

Заключение. В настоящей статье диагностическая задача для сетей из автоматов состояний решена с точностью до локализации компонента с ошибкой. Предложенный способ ее решения снижает сложность синтеза и уменьшает объем диагностического оборудования по сравнению со способами, известными из литературных источников. Полученные в работе оценки позволяют определить эффективность и целесообразность введенных преобразований до решения задачи синтеза средств ФД. В дальнейшем предполагается обобщение результатов, описанных в настоящей статье, на случай сетей из цифровых автоматов общего вида.

Список литературы

1. Ding S. X. Model-based fault diagnosis techniques. Design schemes, algorithms, and tools. Berlin: Springer-Verlag, 2008. 479 p. doi: 10.1007/978-3-540-76304-8

2. Fault detection and isolation for complex system / C. S. Jing, L. B. R. Samad, M. Mustafa, N. R. H. Abdullah, Z. M. Zain, D. Pebrianti // Proc. of the 3rd Intern. Conf. of global network for innovative technology 2016 (3rd IGNITE-2016), Penang, Malaysia, 27–29 Jan. 2016. AIP Conf. Proc. 2017. Vol. 1865, iss. 1. P. 9–16. doi: 10.1063/1.4993392

3. Samy I., Gu D. W. Fault Detection and Isolation (FDI) // Fault Detection and Flight Data Measure-ment. 2012. P. 5–17 (Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol. 419). doi: 10.1007/978-3-642-24052-2_2

4. Li Z., Jaimoukha I. M. Observer-based Fault Detection and Isolation Filter Design for Linear Time-Invariant Systems // Intern. J. of Control. 2009. Vol. 82, iss. 1. P. 171–182. doi: 10.1080/00207170802031528

5. Жирабок А. Н., Шумский А. Е., Павлов С. В. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом // Автоматика и телемеханика. 2017. № 7. С. 3–21.

6. Жирабок А. Н., Шумский А. Е. Непараметрический метод диагностирования нелинейных динамических систем // Автоматика и телемеханика, 2019. № 2. С. 24–45. doi: 10.1134/S0005231019020028

7. Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Sliding Mode Observers for Fault Detection in Linear Dynamic Systems // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, iss. 24. P. 1403–1408. doi: /10.1016/j.ifacol.2018.09.540

8. Hartmanis J., Stearns R. The Algebraic Structure Theory of Sequential Machines. New York: Prentice Hall, 1966. 211 p.

9. Подкопаев Б. П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 2: Системные алгебры, алгебраическая модель функционального диагностирования, реализация модели функционального диагностирования. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2013. 132 с.

10. Щербаков Н. С., Подкопаев Б. П. Структурная теория аппаратного контроля цифровых автоматов. М.: Машиностроение, 1982. 191 с.

11. Калман Р., Фалб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем / пер. с англ.; под ред. Я. З. Цыпкина. 2-е изд. М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с.

12. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов. М.: Физматгиз, 1962. 476 с.

13. Подкопаев Б. П. Алгебраическая теория функционального диагностирования динамических систем: в 2 ч. Ч. 1: Системы, диагностирование систем, системные алгебры. СПб.: Элмор, 2007. 132 с.

14. Быстрова И. В., Подкопаев Б. П. Функциональное диагностирование сетей из цифровых авто-

матов состояний // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 2. С. 12–20. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-2-12-19

15. Быстрова И. В., Подкопаев Б. П. Диагностическое моделирование сети из цифровых автоматов // Сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф., Брянск, 24–25 окт. 2018 г. / Брянск. гос. техн. ун-т. Брянск, 2018. С. 42–46. doi: 10.30987/conferencearticle_5c19e69f2008d0.90195586

16. Толстяков В. С. Обнаружение и исправление ошибок в дискретных устройствах. М.: Сов. радио, 1972. 288 с.

17. Пухальский Г. И., Новосельцева Т. Я. Проектирование цифровых устройств. СПб.: Лань, 2012. 890 с.

Информация об авторах

Быстрова Ирина Валентиновна – магистр техники и технологий по направлению "Инфокоммуникационные технологии и системы связи" (2015), аспирантка кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор пяти научных работ. Сфера научных интересов – техническая диагностика систем радиолокации и радионавигации.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.
E-mail: irinavalentinovn@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-2836-1559

Подкопаев Борис Павлович – доктор технических наук (2011), профессор (2012) кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – математическая теория систем; техническая диагностика и надежность систем радиолокации и радионавигации.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия.
E-mail: bpodkopaev@mail.ru

References

1. Ding S. X. Model-Based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms, and Tools. Berlin, Springer-Verlag, 2008, 479 p. doi: 10.1007/978-3-540-76304-8

2. Jing C. S., Samad L. B. R., Mustafa M., Abdullah N. R. H., Zain Z. M., Pebrianti D. Fault Detection and Isolation for Complex System. Proc. of the 3rd intern. conf. of global network for innovative technology 2016 (3rd IGNITE-2016). Penang, Malaysia, 27–29 Jan. 2016, AIP Conference Proc. 2017, vol. 1865, iss. 1, pp. 9–16. doi: 10.1063/1.4993392

3. Samy I., Gu D. W. Fault Detection and Isolation (FDI). Fault Detection and Flight Data Measurement. 2012, pp. 5–17 (Lecture Notes in Control and Information Sciences. Vol. 419). doi: 10.1007/978-3-642-24052-2_2

4. Li Z., Jaimoukha I. M. Observer-based Fault Detection and Isolation Filter Design for Linear Time-Invariant Systems. Intern. J. of Control. 2009, vol. 82, iss. 1, pp. 171–182. doi: 10.1080/00207170802031528

5. Zhirabok A. N., Shumskij A. E. Diagnosis of Linear Dynamic Systems by Nonparametric Method. Autom. Remote Control. 2017, vol. 78, no. 7 (2017), pp. 1173–1188. (In Russ.)

6. Zhirabok A.N., Shumskij A.E. Nonparametric Method Diagnosis Nonlinear Dynamical Systems. Autom. Remote Control. 2019, no. 2, pp. 24–45. doi: 10.1134/S0005231019020028 (In Russ.)

7. Zhirabok A. N., Shumsky A. E., Zuev A. V. Sliding Mode Observers for Fault Detection in Linear Dynamic Systems. IFAC-PapersOnLine. 2018, vol. 51, iss. 24, pp. 1403–1408. doi: /10.1016/j.ifacol.2018.09.540

8. Hartmanis J., Stearns R. The Algebraic Structure Theory of Sequential Machines. New York, Prentice Hall, 1966, 211 p.

9. Podkopayev B. P. *Algebraicheskaya teoriya funktsional'nogo diagnostirovaniya dinamicheskikh sistem. V 2 ch. Ch. 2: Sistemnye algebry, algebraicheskaya model' funktsional'nogo diagnostirovaniya, realizatsiya modeli funktsional'nogo diagnostirovaniya* [Algebraic Theory of Functional Diagnosis of Dynamic Systems. Pt. 2: System Algebras, Algebraic Model of Functional Diagnosis, Realization of the Functional Diagnosis Model]. SPb, *Izd-vo SPbGETU "LETI",* 2013, 132 p. (In Russ.)

10. Shcherbakov N. S., Podkopayev B. P. *Strukturnaya teoriya apparatnogo kontrolya tsifrovykh avtomatov* [Structural Theory of Digital Automation Hardware Control] Moscow, *Mashinostroyeniye*, 1982, 191 p. (In Russ.)

11. Kalman R. E., Falb P. L., Arbib M. A. Topics in Mathematical System Theory. McGraw Hill Book Co., 1969, 400 p.

12. Glushkov V. M., *Sintez tsifrovykh avtomatov* [Synthesis of Digital Automation]. Moscow, *Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury*, 1962, 476 p. (In Russ.)

13. Podkopayev B. P. *Algebraicheskaya teoriya funktsional'nogo diagnostirovaniya dinamicheskikh sistem. Ch. 1: Sistemy, diagnostirovaniye sistem, sistemnyye algebry* [Algebraic Theory of Functional Diagnosis of Dynamic Systems. Pt. 1: Systems, Diagnostic Systems, System Algebras]. SPb, *Elmor*, 2007, 132 p. (In Russ.)

14. Bystrova I. V., Podkopayev B. P. Functional Diagnostics of Digital State Automation Networks Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 2, pp. 12–20. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-2-12-19 (In Russ.)

15. Bystrova I. V., Podkopayev B. P. Diagnostic Modeling of a Network of Digital Machines. *Trudy "SAPR i modelirovaniye v sovremennoy elektronike"* [Proc. III International Scientific and Practical Conference "CAD/EDA, Modeling and Simulation in the Modern Electronics"]. Bryansk, 2018, pp. 42–46. doi: 10.30987/conferencearticle_5c19e69f2008d0.90195586 (In Russ.)

16. Tolstyakov V. S. *Obnaruzheniye i ispravleniye oshibok v diskretnykh ustroystvakh* [Fault Detection and Isolation in Discrete Devices]. Moscow, *Sovetskoye radio*, 1972, 288 p. (In Russ.)

17. Pukhal'skiy G. I., Novosel'tseva T. Ya. *Proyektirovaniye tsifrovykh ustroystv* [Design of Digital Devices] SPb., Lan', 2012, 890 p. (In Russ.)

Information about the authors

Irina V. Bystrova, Master of Science in Infocommunication Technologies and Communication systems (2015), postgraduate student of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 5 scientific papers. Area of expertise: technical diagnostics of radio location and radio navigation systems.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: irinalentinovn@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0002-2836-1559

Boris P. Podkopaev, Dr. Sci. (Eng.) (2011), Professor (2012) of the Department of Radio Engineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: mathematical theory of systems; technical diagnostics and reliability of radio location and radio navigation systems.
Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia
E-mail: bpodkopaev@mail.ru