

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-767-773

УДК 65.012.122

Избыточные модели контролепригодных распределенных вычислительных систем реального времени

Александр Михайлович Грузликов¹✉, Николай Викторович Колесов²

^{1,2} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

¹ agruzlikov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>

² kolesovnv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>

Аннотация

Рассмотрение вопросов диагностирования занимает важное место в процессе проектирования систем обработки информации и управления, поскольку от качества их решения зависит надежность и отказоустойчивость систем. В работе представлены результаты разработки алгоритма синтеза модели, предназначенной для решения проблемы тестового диагностирования и ориентированной на распределенные вычислительные системы. Алгоритм встраивается в систему и выполняется параллельно с основным программным обеспечением системы, что позволяет упрощать процесс ее тестирования. Описание распределенной вычислительной системы, дополненное встроенной диагностической моделью, составляет избыточную модель системы. Предложенный алгоритм отличается сокращенным объемом диагностической информации. Диагностическая модель имеет иерархическую структуру и создается в два этапа. На первом этапе для графа межмодульных связей системы вычисляется множество путей, которые составляют покрытие его ребер. С каждым из полученных путей сопоставляется цепь из динамических звеньев, равным по числу количества программных модулей, через которые проходит данный путь. На втором этапе определяется вид динамических звеньев. При этом учитывается, что искомая динамическая модель системы используется для построения тестов. Процедура построения тестов упрощается, если модель системы линейна, управляема и наблюдаема. На основании этого формулируются требования к звеньям цепей модели. С помощью разработанного алгоритма можно создать дискретно-событийную модель системы, которая характеризуется сокращенным объемом используемой диагностической информации.

Ключевые слова

дискретно-событийная модель, тестовое диагностирование, контролепригодность, нестационарные модели, наблюдаемость, управляемость

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-08-00052.

Ссылка для цитирования: Грузликов А.М., Колесов Н.В. Избыточные модели контролепригодных распределенных вычислительных систем реального времени // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 5. С. 767–773. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-767-773

Redundant models of testable distributed real-time computing systems

Alexander M. Gruzlikov¹✉, Nikolai V. Kolesov²

^{1,2} Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

¹ agruzlikov@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>

² kolesovnv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>

Abstract

Diagnostic issues receive a lot of attention in the design of information processing and control systems since the systems' reliability and fault tolerance depends on the quality of their solution. The article presents the results of the development of a synthesis algorithm for a model designed to solve the problem of test diagnostics and focused on distributed

computing systems. The algorithm is integrated in the system and executed in parallel with the main software of the system, which makes it possible to simplify the process of testing the system. The description of a distributed computing system, complemented by an integrated diagnostic model, is a redundant model of the system. The proposed algorithm implies a reduced amount of diagnostic information. The diagnostic model has a hierarchical structure and involves two stages. At the first stage, the algorithm calculates the set of paths that make up the coverage of its edges for the graph of intermodular connections in the system. It matches a chain of dynamic links with each of the obtained paths, the number of the links being equal to the number of software modules through which this path passes. At the second stage, the type of dynamic links is determined. It is taken into account that the desired dynamic model of the system is used to generate tests. The test design procedure is simplified if the system model is linear, controllable, and observable. Based on this, the requirements for the links of the chains of the model are formulated. The proposed algorithm makes it possible to obtain a discrete-event model for the system characterized by a reduced amount of used diagnostic information.

Keywords

discrete-event model, test diagnostics, testability, non-stationary models, observability, controllability

Acknowledgements

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-08-00052).

For citation: Gruzlikov A.M., Kolesov N.V. Redundant models of testable distributed real-time computing systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 767–773 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-5-767-773

Введение

Проблема диагностирования — одна из центральных при разработке сложных технических систем различного применения [1, 2]. Решению этой проблемы посвящены многочисленные научные работы, которые отличаются используемой моделью объекта диагностирования, например, в виде динамической системы или конечного автомата [3–8]. Применение подобных моделей в составе современных сложных технических систем оказывается затруднительным, поскольку может потребовать для тестирования системы в целом экспоненциальное число тестовых воздействий [9, 10]. Один из выходов из создавшегося положения — использование аппарата сетей Петри [11–14], но и этому подходу, с точки зрения авторов настоящей работы, свойственны существенные недостатки, а именно, отсутствие эффективных алгоритмов построения тестов.

Рассмотрим альтернативную концепцию решения проблемы диагностирования сложных систем. Основу концепции составляет иерархический подход, при котором компоненты сложной системы разбиваются с учетом отношения включения на уровни сложности, например, безынерционные устройства, динамические, мультирежимные и распределенные системы. В каждом конкретном случае количество уровней может быть как больше, так и меньше. Для каждого компонента каждого уровня разрабатываются свои уровневые средства диагностирования (СД). При этом компонент описывается композицией компонентов более низкого уровня. Рассматриваемый класс отказов представлен нарушениями информационных связей между компонентами (кроме самого нижнего уровня, где отказы определяются в терминах структуры компонента). Таким образом, общая задача разработки СД для сложной системы декомпозируется на подзадачи разработки уровней СД. В настоящей работе рассмотрены проблемы диагностирования верхнего уровня, где распределенная вычислительная система реального времени представлена композицией локальных систем, а класс отказов состоит из нарушений в адресации информационных обменов.

Известно, что решение задачи диагностирования всегда связано с введением в систему аппаратурной или временной избыточности, которую могут составлять применяемые СД. При использовании тестовых СД обычно также говорят о временной избыточности. Вводимая в систему избыточность может быть направлена на упрощение процесса диагностирования. Так, например, могут вводиться дополнительные входы и выходы, анализаторы информации и т. п. Подобные системы принято называть контролепригодными. К данному направлению относится подход, предложенный авторами в работах [15–17] и развитый в данной работе. Подход определяет процесс введения избыточности в систему с целью упрощения процедур построения тестов системы верхнего уровня и сокращения длины самих тестов. Качественно степень сокращения можно оценить, сопоставив данный подход с предложенным в [9, 10]. Тест построен для автомата общего вида в отличие от исследуемого случая, когда тест всегда строится для линейного автомата. Тест для автомата общего вида включает экспоненциальное число фрагментов (по числу переходов), в то время как для линейного автомата включает лишь полиномиальное количество.

Предварительные сведения и постановка задачи

Рассмотрим распределенные вычислительные системы (РВС) реального времени. Важная особенность таких систем — периодичность потока входных данных. В результате процессы обработки информации в системах также периодические. Исследуем процедуру синтеза диагностических моделей верхнего уровня. В этом случае распределенная система представлена композицией локальных систем. Однако можно рассмотреть другую задачу, когда РВС представляется своим программным обеспечением — композицией составляющих его программных модулей. При этом программные модули могут быть размещены как на одном, так и на разных процессорах РВС и обмениваться необходимой информацией по ее готовности. В рассматриваемый класс отказов будут входить всевозможные нарушения в адресации обменов между программными модулями.

Примеры нарушений показаны на рисунке, где представлен эталонный информационный граф системы (рисунок, *a*), а также графы, соответствующие возможным неисправным модификациям системы: дополнительный обмен (рисунок, *b*), дублирующий обмен (рисунок, *c*) и дублирующий программный модуль (рисунок, *d*).

Заметим, что доля нарушений в составе множества всех рассматриваемых отказов РВС невелика, однако их значимость существенна, так как они нарушают конфигурацию системы. Перечисленные задачи (с представлением локальными системами и программными модулями) могут быть решены в рамках исследуемого подхода. В работе рассмотрен второй вариант решения задачи.

Особенность подхода — дискретно-событийная модель встраивается в систему, выполняется параллельно с основным программным обеспечением системы и позволяет упрощать процесс ее тестового диагностирования. В силу указанной особенности подход назван диагностированием с параллельной моделью. Основной вклад настоящей работы состоит в формулировке достаточных условий наблюдаемости и управляемости для диагностических моделей, описываемых в отличие от предшествующих работ [15–17] в поле действительных чисел.

Базовая идея подхода состоит в следующем. В процессе использования СД формируют для системы S тестовые данные, дополняя ими входные данные, и анализируют ее выходную реакцию. Одновременно в каждый программный модуль поступает рабочая информация, которая обрабатывается штатными алгоритмами. Параллельно с этим тестовые данные обрабатываются алгоритмами диагностической модели, встроенными в программные модули и реагирующими на события приема информации. Результаты обработки тестовых и рабочих данных выдаются в составе общих выходных массивов. Таким образом, возникает возможность по наблюдаемым в процессе работы тестовым результатам делать вывод о наличии или отсутствии нарушений в адресации обменов. Остается вопрос о синтезе диагностической модели. Он состоит из двух этапов. На первом этапе построения модели формируется множество вычислительных путей, составляющих покрытие ребер графа межмодульных связей. Затем с каждым из полученных путей сопоставляется цепь из такого числа динамических звеньев, через сколько программных модулей проходит данный путь. В работе [15] показана целесообразность выбора линейных динамических звеньев

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{f}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{g}_i \mathbf{u}_i(t), \mathbf{y}_i(t) = \mathbf{h}_i \mathbf{x}_i(t) \quad i = \overline{1, v},$$

где $\mathbf{x}_i(t)$, $\mathbf{u}_i(t)$, $\mathbf{y}_i(t)$ — векторы состояния, входа и выхода; \mathbf{f}_i , \mathbf{g}_i , \mathbf{h}_i — матрицы динамики, входа и выхода соответственно для i -го звена цепи; v — число звеньев в модели. При этом диагностическая модель S^m будет состоять из набора цепей и в целом также будет линейна. Ее вектор состояния составлен из векторов состояния звеньев $\mathbf{x}_i(t)$, $i = \overline{1, v}$, а передача информации между звеньями описывается блочными матрицами $\mathbf{F}(t)$, $\mathbf{G}(t)$, $\mathbf{H}(t)$. Свяжем с каждой последовательностью матриц на

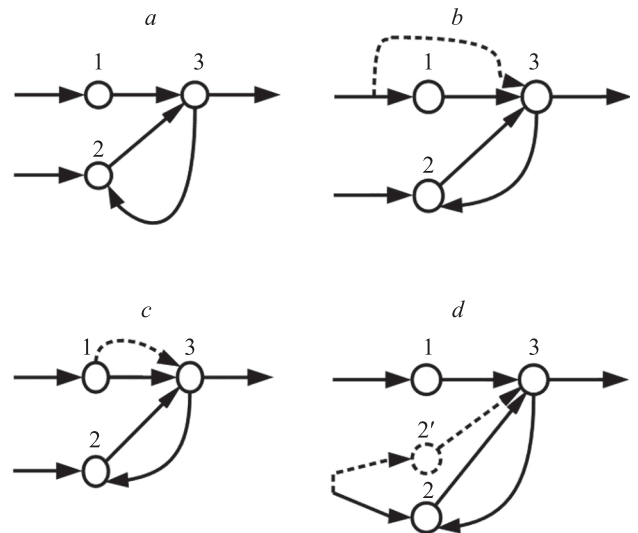


Рисунок. Пример правильной (*a*) и ошибочной адресации обмена (*b–d*)

Figure. An example of correct (*a*) and incorrect addressing of the exchange (*b–d*)

интервале, равном периоду, свою последовательность индексов.

Множество таких последовательностей обозначим через $\Gamma = \{\gamma_s | s = \overline{1, N}\}$, где N — общее число обменов в системе. Их начальные отрезки на интервале длительностью в период получаются в результате циклического сдвига последовательности индексов $1, 2, \dots, N$. В результате диагностическая модель S^m имеет вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t+1) &= \mathbf{F}(\gamma_s(j))\mathbf{x}(t) + \mathbf{G}(\gamma_s(j))\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{H}(\gamma_s(j))\mathbf{x}(t) \quad j = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (1)$$

В формуле (1) матрицы зависят от номера такта (номера обмена), т. е. модель нестационарна. Более того, она периодически нестационарна, так как из-за периодичности входного потока процессы обработки данных в системе периодические.

Чтобы сократить объем диагностической информации, передаваемой через каналы обмена, целесообразно воспользоваться приемом, заключающимся в обработке нескольких массивов информации одним звеном (слияние вычислительных путей) [15]. В результате сокращается размерность объединенного выходного вектора всех программных модулей, следовательно, и объем выдаваемой в каждом такте из этих модулей диагностической информации. Причем, если модель с независимыми цепями включает L цепей, то сокращение выходного вектора может достигать L раз.

Напомним, что свойства наблюдаемости и управляемости для нестационарных систем зависят от используемых для наблюдения и управления интервалов γ_s , поэтому говорят о γ_s -наблюдаемости и γ_s -управляемости.

Для дальнейшего изложения потребуется свойство, сформулированное в работах [15–16].

Свойство 1. Возможно сведение к стационарной модели \hat{S}^m любой периодически нестационарной модели S^m системы S из рассматриваемого класса, т. е.

имеющей на периоде один сеанс приема и один сеанс выдачи информации в СД. При этом нестационарная система с независимыми цепями переходит в стационарную систему с независимыми цепями, а нестационарная система со слиянием цепей — в стационарную систему со слиянием цепей.

Итак, для любой периодически нестационарной системы S^m , которая описывается моделью (2), имеет на периоде функционирования один сеанс приема информации от СД, описываемый для некоторой последовательности γ_r , матрицами $\mathbf{F}(\gamma_r(N))$, $\mathbf{G}(\gamma_r(N))$, $\mathbf{H}(\gamma_r(N))$, и один сеанс выдачи информации в СД, описываемый матрицами $\mathbf{F}(\gamma_r(N-1))$, $\mathbf{G}(\gamma_r(N-1))$, $\mathbf{H}(\gamma_r(N-1))$ существует стационарная система \hat{S}^m :

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k), \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k), \quad (2)$$

которая при любой входной последовательности формирует выходные последовательности, совпадающие с выходными последовательностями системы S^m на γ_r . При этом k — периоды системы (1),

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}_{\Pi}(\gamma_r) = \prod_{i=1}^N \mathbf{F}(\gamma_r(N-i+1)), \mathbf{B} = \mathbf{G}(\gamma_r(N)), \\ \mathbf{C} = \mathbf{H}(\gamma_r(N-1))\mathbf{A}.$$

Рассмотрим следующую задачу. Предполагается, что для диагностируемой системы S^m задана иерархическая структура модели с произвольным числом точек слияния. Необходимо сформулировать достаточные условия, которым должны удовлетворять звенья модели, и при которых модель системы будет наблюдаема и управляема.

Поиск условий осуществляется при следующих предположениях:

- 1) описание моделей S^m и \hat{S}^m — в поле действительных чисел;
- 2) система S^m включает только звенья со скалярными входами и выходами, что уменьшает количество передаваемой диагностической информации, но и максимально усложняет проблему обеспечения наблюдаемости и управляемости системы в целом.

Условия наблюдаемости и управляемости параллельной модели

Пусть все звенья системы имеют скалярные входы и выходы. Кроме того, для определенности предположим, что они реализованы в столбцовой наблюдаемой форме:

$$\mathbf{f}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_{m_i,i} \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_{m_i-1,i} \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & -\alpha_{m_i-2,i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -\alpha_{1,i} \end{bmatrix},$$

при этом входная и выходная матрицы имеют вид

$$\mathbf{g}_i = [g_{1,i} \ g_{2,i} \ \dots \ g_{m_i-1,i} \ g_{m_i,i}]^T, \\ \mathbf{h}_i = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ h_{m_i,i}].$$

Здесь $\alpha_{j,i}, j = \overline{1, m_i}$ — коэффициенты характеристического многочлена матрицы \mathbf{f}_i . Причем $\alpha_{m_i,i} \neq 0$, так

как в дальнейшем предполагается, что \mathbf{f}_i неособенная. Проанализируем модель цепи.

Утверждение 1. Линейная в поле действительных чисел стационарная цепь \hat{S}^c , которая соответствует периодически нестационарной цепи S^c , и которая включает L скалярных звеньев $(\mathbf{f}_i, \mathbf{g}_i, \mathbf{h}_i)$, состоит из звеньев $(\bar{\mathbf{f}}_i, \bar{\mathbf{g}}_i, \bar{\mathbf{h}}_i)$, где $\bar{\mathbf{f}}_i = \mathbf{f}_i, \bar{\mathbf{g}}_i = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T, i = \overline{1, L}, \bar{\mathbf{h}}_i = [0 \ \dots \ 0 \ 1], \bar{\mathbf{h}}_i = \mathbf{h}_i \mathbf{f}_i = [0 \ 0 \ \dots \ h_{m_i,i} \ -\alpha_{1,i} h_{m_i,i}], i = \overline{2, L}$.

Справедливость приведенных в утверждении структур выходных матриц звеньев может быть установлена непосредственной проверкой и объясняется срабатыванием звеньев при приеме информации, а для выходного звена выражением для матрицы \mathbf{C} (свойство 1).

Утверждение 2. Линейная в поле действительных чисел стационарная цепь \hat{S}^c из скалярных звеньев $(\bar{\mathbf{f}}_i, \bar{\mathbf{g}}_i, \bar{\mathbf{h}}_i), i = \overline{1, L}$ (утверждение 1) наблюдаемая (управляемая), если ее звенья наблюдаемые (управляемые).

Доказательство. В справедливости условия наблюдаемости легко убедиться, если воспользоваться для описания звеньев и цепи в целом обыкновенными разностными уравнениями. При этом из наблюдаемости i -го звена размерности n_i следует существование для характеристического многочлена его разностного уравнения n_i корней. Как следствие, для характеристического многочлена разностного уравнения цепи $\varphi^c = \sum_{i=1}^L \varphi_i$. Это означает существование n корней $n = \sum_{i=1}^L n_i$, и n линейно независимых решений, что свидетельствует о наблюдаемости цепи [15].

Условия управляемости цепи легко доказываются на основе принципа двойственности. ■

Пусть модель содержит лишь одну точку слияния. Далее будут использованы приемы доказательства, примененные при исследовании наблюдаемости и управляемости цепи.

Утверждение 3. Линейная в поле действительных чисел стационарная система \hat{S}^f , которая соответствует периодически нестационарной системе S^f со слиянием p цепей, включает звено слияния $(\bar{\mathbf{h}}_0, \bar{\mathbf{f}}_0, \bar{\mathbf{g}}_0)$ размерности m_0 с матрицами $\bar{\mathbf{f}}_0 = \mathbf{f}_0^p, \bar{\mathbf{g}}_0 = [\mathbf{f}_0^{p-1} \ \mathbf{g}_0 \ \mathbf{f}_0^{p-2} \ \mathbf{g}_0 \ \dots \ \mathbf{g}_0], \bar{\mathbf{h}}_0 = [\mathbf{f}_0^p]_{m_0}$ — последняя m_0 -я строка матрицы \mathbf{f}_0^p , а также p цепей, причем l -я цепь содержит L_l звеньев $(\bar{\mathbf{f}}_l, \bar{\mathbf{g}}_l, \bar{\mathbf{h}}_l)$, где $\bar{\mathbf{f}}_l = \mathbf{f}_l, \bar{\mathbf{g}}_l = \mathbf{g}_l = [1 \ 0 \ \dots \ 0]^T, i = \overline{1, L_l}, \bar{\mathbf{h}}_l = [0 \ \dots \ 0 \ 1], \bar{\mathbf{h}}_l = \mathbf{h}_l \mathbf{f}_l = [0 \ 0 \ \dots \ h_{m_i,i} \ -\alpha_{1,i} h_{m_i,i}], i = \overline{2, L_l}$.

Справедливость приведенных в утверждении структур выходных матриц звеньев может быть установлена непосредственной проверкой.

Утверждение 4. Линейная в поле действительных чисел стационарная система \hat{S}^f с одной точкой слияния наблюдаемая (управляемая), если все ее цепи и звено слияния $(\bar{\mathbf{h}}_0, \bar{\mathbf{f}}_0, \bar{\mathbf{g}}_0)$ наблюдаемые (управляемые).

Доказательство. Для доказательства утверждения также можно воспользоваться для описания цепей и системы \hat{S}^f в целом обыкновенными разностными уравнениями. При этом из наблюдаемости j -ой цепи размерности n_j следует наличие у ее характеристического многочлена n_j корней. Как следствие, для харак-

теристического многочлена разностного уравнения системы $\hat{S}^f \quad \varphi^f = \varphi_0^p \prod_{j=1}^p \varphi_j^c$, где φ_0^p — характеристический многочлен звена слияния в степени p ; φ_j^c — характеристический многочлен j -ой цепи $j = \overline{1, p}$, это означает существование n корней $n = n_0 + \sum_{i=1}^L n_i$, и n линейно независимых решений, что свидетельствует о наблюдаемости системы. Условия управляемости, как и в случае цепи, легко доказываются на основе принципа двойственности. ■

Обсудим теперь условия наблюдаемости и управляемости для иерархической стационарной структуры \hat{S}^h . В этом случае модель содержит более одной точки слияния. Очевидно, что этот анализ можно осуществить, применяя выше доказанные утверждения итерационно в направлении, например, от входа к выходу. При этом ближайшие к входу точки слияния анализируются на основе доказанных утверждений. При дальнейшем анализе каждый из этих фрагментов структуры, заканчивающихся точками слияния, представляется одним звеном и т. д.

Получить искомые условия наблюдаемости и управляемости можно, воспользовавшись известным фактом [15], что, если все матрицы динамики периодически нестационарной системы S^h (2) неособенные, а соответствующая ей стационарная система \hat{S}^h (3) наблюдаема и управляема, то система S^h наблюдаема и управляема.

Пример. Проиллюстрируем описанный порядок вычислений на примере слияния в звене M_0 двух цепей, первая из которых включает одно звено M_1 , а вторая — три звена M_2, M_3, M_4 .

Пусть вектор состояния модели имеет следующий формат $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_0]^T$. Тогда имеем следующую последовательность матриц обменов на периоде, заканчивающихся сеансом приема тестовой информации от СД (здесь \mathbf{E} — единичная матрица):

$$\mathbf{F}_{1,0}(1) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & & & & \\ & \mathbf{E} & & & \\ & & \mathbf{E} & & \\ & & & \mathbf{E} & \\ \mathbf{g}_0 \mathbf{h}_1 & & & & \mathbf{f}_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{2,3}(2) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & & & & \\ & \mathbf{E} & & & \\ & \mathbf{g}_3 \mathbf{h}_2 \ \mathbf{f}_3 & & & \\ & & & \mathbf{E} & \\ & & & & \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{3,4}(3) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & & & & \\ & \mathbf{E} & & & \\ & & \mathbf{E} & & \\ & & & \mathbf{g}_4 \mathbf{h}_3 \ \mathbf{f}_4 & \\ & & & & \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{4,0}(4) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & & & & \\ & \mathbf{E} & & & \\ & & \mathbf{E} & & \\ & & & \mathbf{E} & \\ & & & & \mathbf{g}_0 \mathbf{h}_4 \ \mathbf{f}_0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{0,СД}(5) = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & & & & \\ & \mathbf{E} & & & \\ & & \mathbf{E} & & \\ & & & \mathbf{E} & \\ & & & & \mathbf{E} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_{СД,1,3}(6) = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_1 & & & & \\ & \mathbf{f}_2 & & & \\ & & \mathbf{E} & & \\ & & & \mathbf{E} & \\ & & & & \mathbf{E} \end{bmatrix}.$$

Выберем вид звеньев. Используем цепи, состоящие из одинаковых звеньев. Пусть размерность звеньев цепей и звена слияния равна 3, а их характеристические полиномы имеют вид:

$$\varphi_{f_1} = \varphi_{f_2} = \varphi_{f_3} = \varphi_{f_4} = \varphi_{f_0} = x^3 + 6x^2 + 11x + 6.$$

Выберем описание для звеньев нестационарных цепей:

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}_2 = \mathbf{f}_3 = \mathbf{f}_4 = \mathbf{f}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -6 \\ 1 & 0 & -11 \\ 0 & 1 & -6 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}_1 = \mathbf{g}_2 = \mathbf{g}_3 = \mathbf{g}_4 = \mathbf{g}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2 = \mathbf{h}_3 = \mathbf{h}_4 = \mathbf{h}_0 = [0 \ 0 \ 1].$$

Тогда звенья стационарных цепей и звено слияния стационарной модели имеют вид:

$$\bar{\mathbf{f}}_1 = \bar{\mathbf{f}}_2 = \bar{\mathbf{f}}_3 = \bar{\mathbf{f}}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -6 \\ 1 & 0 & -11 \\ 0 & 1 & -6 \end{bmatrix},$$

$$\bar{\mathbf{g}}_1 = \bar{\mathbf{g}}_2 = \bar{\mathbf{g}}_3 = \bar{\mathbf{g}}_4 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}_1 = \mathbf{h}_2 = [0 \ 0 \ 1], \bar{\mathbf{h}}_3 = \bar{\mathbf{h}}_4 = [0 \ 1 \ 0],$$

$$\varphi_{\bar{f}_1} = \varphi_{\bar{f}_2} = \varphi_{\bar{f}_3} = \varphi_{\bar{f}_4} = x^3 + 6x^2 + 11x + 6,$$

$$\bar{\mathbf{f}}_0 = \mathbf{f}_0^2 = \begin{bmatrix} 1 & -6 & 30 \\ 1 & -11 & 60 \\ 0 & -6 & -30 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{g}}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}_0 = [1 \ -6 \ -30], \varphi_{\bar{f}_0} = x^3 + 62x^2 + 603x + 300.$$

Все описанные звенья являются наблюдаемыми и управляемыми. При этом их характеристические мно-

гочлены неприводимы, что гарантирует выполнение условий наблюдаемости и управляемости для модели.

Заключение

В работе для распределенной вычислительной системы реального времени исследованы вопросы синтеза контролепригодной диагностической модели. Использование этой модели при высокоуровневом тестовом диагностировании предполагает встраива-

ние ее в систему и параллельное исполнение наряду с основным программным обеспечением. В результате представлена процедура синтеза модели в поле действительных чисел. Она упрощает процесс синтеза и сокращает объем передаваемой диагностической информации. Для данных моделей формулируются достаточные условия наблюдаемости и управляемости.

Литература

1. Bhandari G.P., Gupta R. Fault analysis of service-oriented systems: a systematic literature review // *IET Software*. 2018. V. 12. N 6. P. 446–460. <https://doi.org/10.1049/iet-sen.2018.5249>
2. Khalastchi E., Kalech M. Fault detection and diagnosis in multi-robot systems: A Survey // *Sensors*. 2019. V. 19. N 18. P. 4019. <https://doi.org/10.3390/s19184019>
3. Шумский А.Е., Жирабок А.Н., Гаджиев Ч. Диагностирование и отказоустойчивое управление динамическими системами. Владивосток: Дальневосточный федеральный ун-т, 2016. 178 с.
4. Бритов Г.С., Мироновский Л.А. Достоверность и чувствительность терминального диагностирования управляемых динамических систем // *Информационно-управляющие системы*. 2019. № 4. С. 29–37. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-4-29-37>
5. Сперанский Д.В. Лекции по теории экспериментов с конечными автоматами. М.: Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2016. 354 с.
6. Jung D., Khorasgani H., Frisk E., Krysander M., Biswas G. Analysis of fault isolation assumptions when comparing model-based design approaches of diagnosis systems // *IFAC-PapersOnLine*. 2015. V. 48. N 21. P. 1289–1296. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.703>
7. Krokavec D., Filasová A. Regular approach to additive fault detection in discrete-time linear descriptor systems // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. V. 313. P. 61–74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58964-6_5
8. Han W., Wang Z., Shen Y., Liu Y. H-/L ∞ fault detection for linear discrete-time descriptor systems // *IET Control Theory & Applications*. 2018. V. 12. N 15. P. 2156–2163. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2017.1408>
9. Бурдонов И.Б., Косачев А.С. Тестирование системы автоматов с буферизацией сообщений // *Труды Института системного программирования РАН*. 2016. Т. 28. № 1. С. 103–130. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28\(1\)-7](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-7)
10. Бурдонов И.Б., Косачев А.С. Система автоматов: условия детерминизма и тестирование // *Труды Института системного программирования РАН*. 2016. Т. 28. № 1. С. 151–184. [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28\(1\)-9](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-9)
11. Li B., Khelif-Bouassida M., Toguyéni A. On-the-fly diagnosability analysis of bounded and unbounded labeled petri nets using verifier nets // *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*. 2018. V. 28. N 2. P. 269–281. <https://doi.org/10.2478/amcs-2018-0019>
12. Fanti M.P., Mangini A.M., Ukovich W. Fault detection by labeled Petri nets in centralized and distributed approaches // *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2013. V. 10. N 2. P. 392–404. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2203596>
13. Cabasino M.P., Giua A., Lafortune S., Seatzu C. A new approach for diagnosability analysis of Petri nets using verifier nets // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2012. V. 57. N 12. P. 3104–3117. <https://doi.org/10.1109/TAC.2012.2200372>
14. Cabasino M.P., Giua A., Paoli A., Seatzu C. Decentralized diagnosis of discrete-event systems using labeled Petri nets // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2013. V. 43. N 6. P. 1477–1485. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2244208>
15. Грузликов А.М., Колесов Н.В. Дискретно-событийная диагностическая модель распределенной вычислительной системы. Независимые цепи // *Автоматика и телемеханика*. 2016. № 10. С. 140–155.
16. Грузликов А.М., Колесов Н.В. Дискретно-событийная диагностическая модель для распределенной вычислительной системы.

References

1. Bhandari G.P., Gupta R. Fault analysis of service-oriented systems: a systematic literature review. *IET Software*, 2018, vol. 12, no. 6, pp. 446–460. <https://doi.org/10.1049/iet-sen.2018.5249>
2. Khalastchi E., Kalech M. Fault detection and diagnosis in multi-robot systems: A Survey. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 18, pp. 4019. <https://doi.org/10.3390/s19184019>
3. Shumsky A. Ye., Zhirabok A. N., Hadjiev C. *Diagnosis and Fault Tolerant Control in Dynamic Systems*. Vladivostok, Far Eastern Federal University, 2016, 178 p. (in Russian)
4. Britov G.S., Mironovskiy L.A. Accuracy and sensitivity of terminal diagnostics of controlled dynamic systems. *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy*, 2019, no. 4, pp. 29–37. (in Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-4-29-37>
5. Speranskii D.V. *Lectures on Theory of Experiments with Finite Automata*. Moscow, INTUIT Publ., 2016, 354 p. (in Russian)
6. Jung D., Khorasgani H., Frisk E., Krysander M., Biswas G. Analysis of fault isolation assumptions when comparing model-based design approaches of diagnosis systems. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 21, pp. 1289–1296. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.703>
7. Krokavec D., Filasová A. Regular approach to additive fault detection in discrete-time linear descriptor systems. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, vol. 313, pp. 61–74. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58964-6_5
8. Han W., Wang Z., Shen Y., Liu Y. H-/L ∞ fault detection for linear discrete-time descriptor systems. *IET Control Theory & Applications*, 2018, vol. 12, no. 15, pp. 2156–2163. <https://doi.org/10.1049/iet-cta.2017.1408>
9. Burdonov I.B., Kossatchev A.S. Testing of automata system. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2016, vol. 28, no. 1, pp. 103–130. (in Russian). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28\(1\)-7](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-7)
10. Burdonov I., Kossatchev A. Automata system: determinism conditions and testing. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, 2016, vol. 28, no. 1, pp. 151–184. (in Russian). [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28\(1\)-9](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2016-28(1)-9)
11. Li B., Khelif-Bouassida M., Toguyéni A. On-the-fly diagnosability analysis of bounded and unbounded labeled petri nets using verifier nets. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 269–281. <https://doi.org/10.2478/amcs-2018-0019>
12. Fanti M.P., Mangini A.M., Ukovich W. Fault detection by labeled Petri nets in centralized and distributed approaches. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 392–404. <https://doi.org/10.1109/TASE.2012.2203596>
13. Cabasino M.P., Giua A., Lafortune S., Seatzu C. A new approach for diagnosability analysis of Petri nets using verifier nets. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, vol. 57, no. 12, pp. 3104–3117. <https://doi.org/10.1109/TAC.2012.2200372>
14. Cabasino M.P., Giua A., Paoli A., Seatzu C. Decentralized diagnosis of discrete-event systems using labeled Petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, vol. 43, no. 6, pp. 1477–1485. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2244208>
15. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V. Discrete-event diagnostic model for a distributed computational system. independent chains. *Automation and Remote Control*, 2016, vol. 77, no. 10, pp. 1805–1817. <https://doi.org/10.1134/S0005117916100076>
16. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V. Discrete-event diagnostic model for a distributed computational system. Merging chains. *Automation and*

Слияние цепей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 4. С. 126–134.

17. Лукоянов Е.В., Грузликов А.М. Синтез иерархической диагностической модели потоковой вычислительной системы реального времени // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. С. 677–682. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-5-677-682>

Remote Control, 2017, vol. 78, no. 4, pp. 682–688. <https://doi.org/10.1134/S0005117917040099>

17. Lukoyanov E.V., Gruzlikov A.M. Hierarchical diagnostic model synthesis for dataflow real-time computing system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 5, pp. 677–682. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2020-20-5-677-682>

Авторы

Грузликов Александр Михайлович — кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0001-8814-0726) 56037536900, <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>, agruzlikov@yandex.ru

Колесов Николай Викторович — доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0003-3287-7504) 6602000556, <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>, kolesovnv@mail.ru

Authors

Alexander M. Gruzlikov — PhD, Head of Department, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0001-8814-0726) 56037536900, <https://orcid.org/0000-0001-8814-0726>, agruzlikov@yandex.ru

Nikolai V. Kolesov — D.Sc., Professor, Chief Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0003-3287-7504) 6602000556, <https://orcid.org/0000-0003-3287-7504>, kolesovnv@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.07.2021
Одобрена после рецензирования 10.08.2021
Принята к печати 05.10.2021

Received 06.07.2021
Approved after reviewing 10.08.2021
Accepted 05.10.2021



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»