УДК 004.75

# СИНТЕЗ НАБЛЮДАЕМОЙ И УПРАВЛЯЕМОЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ[1]

**А.М. Грузликов**
*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.
E-mail: agruzlikov@yandex.ru

**Н.В. Колесов**
*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.
E-mail: kolesovnv@mail.ru

**Е.В. Лукоянов**
*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.
E-mail: lukoyanov.egor@mail.ru

**М.В. Толмачева**
*АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»*
Россия, 197046, Санкт-Петербург, ул. М. Посадская, д. 30.
E-mail: marina-tolm@yandex.ru

**Ключевые слова:** диагностирование, вычислительные системы реального времени, нестационарные модели.

**Аннотация:** Исследуется параллельная модель распределенной вычислительной системы реального времени. Модель встраивается в программное обеспечение системы и предназначена для тестового диагностирования нарушений в адресации обменов между программными модулями системы. Основу модели составляет сеть Петри, с переходами которой сопоставлены простые диагностические алгоритмы. Обсуждаются вопросы наблюдаемости и управляемости предложенной модели.

## 1. Введение

Рассмотрение вопросов диагностирования занимает важное место в процессе проектирования систем обработки информации и управления, поскольку от качества их решения зависит надежность и отказоустойчивость систем. Применяемые на практике решения основываются на техниках функционального и тестового диагностирования [1-3]. Объектом рассмотрения в настоящем докладе является произвольная распреде-

[1] Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-08-00052)

ленная вычислительная система (РВС) реального времени, которую можно представить как совокупность функционально связанных программных модулей (ПМ), размещенных на процессорах РВС и обменивающихся необходимой информацией асинхронно. Ниже исследуются вопросы синтеза диагностической модели РВС, ориентированной на решение проблемы тестового диагностирования с параллельной моделью [4, 5]. Данную модель с точки зрения рассматриваемого класса отказов можно отнести к дискретно-событийным системам [6], когда работа системы представляется на языке последовательностей некоторых событий. В данном случае это события информационных обменов между ПМ. Подобные модели широко применяются при анализе и тестировании сложных систем [7]. Предлагаемый далее алгоритм синтеза модели представляет собой усовершенствованную версию алгоритма, разработанного авторами ранее [8 - 10]. Алгоритм позволяет сокращать объем диагностической информации передаваемой между ПМ.

## 2. Предварительные сведения и постановка задачи

Особенностью рассматриваемого подхода, отличающей его от большинства известных, является введение избыточности в каждый ПМ анализируемой системы. Это позволяет повысить эффективность тестирования. Вводимая избыточность по существу представляет собой модель системы, вычисляемую совместно с основной программой. Тестовые данные включаются в единый информационный массив с реальными данными, но обрабатываются не штатными алгоритмами, а алгоритмами, реагирующими на события приема/выдачи информации, результаты их обработки выдаются в составе единых выходных данных. Поскольку механизм обмена реальными и тестовыми данными в системе является общим, возникает возможность по наблюдаемым в процессе работы тестовым результатам делать вывод о наличии или отсутствии нарушений в адресации обменов.

Предлагаемый алгоритм справедлив для любой РВС реального времени и состоит из двух этапов. На первом этапе создается структура модели. Для этого сначала по виду РВС формируется сеть Петри [6]. Переходы сети взвешены алгоритмами, исполняемыми в ПМ системы. Будем предполагать ограниченность получаемой сети, что естественно для реальных корректно построенных систем.

Далее на основе известных алгоритмов формируется множество вычислительных путей, составляющих покрытие дуг графа сети. При этом под вычислительным путем понимаем последовательность срабатывающих переходов сети, соединяющую некоторую входную позицию с некоторой выходной. Затем с каждым из полученных путей сопоставляется цепь из такого числа динамических звеньев, через сколько переходов проходит данный путь. После описанных построений модель системы представляется совокупностью функционально независимых цепей, а задача диагностирования может быть сведена к диагностированию отдельных цепей.

На втором этапе формирования модели определяется вид динамических звеньев. При этом основополагающим является тот факт, что искомая динамическая модель системы далее используется для построения тестов. Известно [3], что процедура построения тестов упрощается, если модель системы, во-первых, линейна, а во-вторых, управляема и наблюдаема. Отсюда можно сформулировать требование к звеньям цепей модели. Они должны быть линейны. Кроме того, звенья должны быть таковы, чтобы модель системы была бы управляема и наблюдаема.

Таким образом, проблема состоит в построении алгоритмов обработки тестов в ПМ, а также в построении по виду этих алгоритмов самих тестов. В докладе рассматривается лишь первая задача. Модель системы, как будет показано ниже, имеет вид линейной дискретной периодически нестационарной системы. В терминах этой модели класс рассматриваемых нарушений определяется как всевозможные искажения матриц этой модели.

После описанных построений структура модели системы представляется совокупностью независимых цепей, а задача диагностирования может быть сведена к диагностированию отдельных цепей. Однако применение описанной выше модели РВС может в некоторых случаях потребовать передачи через каналы обмена большого количества диагностической информации, что не всегда допустимо. В таких ситуациях целесообразно воспользоваться приемом, заключающимся в обработки нескольких массивов информации одним звеном (слияние вычислительных путей).

Динамическое описание цепи или модели со слиянием цепей, определяется по следующим правилам. Используется вектор состояния $x(t)$, составленный из векторов состояния звеньев $x_i(t)$ $i=\overline{1,L}$, входящих в эту цепь, а с помощью матриц $F(t), G(t), H(t)$ описывается перенос информации между ПМ и системой диагностирования (СД) в каждом j-м информационном обмене. Учитывая, что в настоящей работе рассматриваются системы реального времени, которые характеризуются периодическим процессом обработки информации, а, значит, и периодическими обменными процессами. Следовательно, матрицы $F(t), G(t), H(t)$ будут периодически повторяться, а модель системы будет периодически нестационарной. Для удобства описания свяжем с каждой последовательностью матриц на интервале, равном периоду, свою последовательность индексов, множество которых обозначим через $\Gamma=\{\gamma_r \,|\, r=\overline{1,L+1}\}$. Их начальные отрезки на интервале длительностью в период получаются в результате циклического сдвига последовательности индексов 1, 2, …, $L$+1. Например, при L = 2 имеем три последовательности индексов: Γ={1, 2, 3; 2, 3, 1; 3, 1, 2}.Тогда

(1) $$x(t+1)=F(\gamma_r(j))x(t)+G(\gamma_r(j))u(t), \quad y(t)=H(\gamma_r(j))x(t) \quad j=\overline{1,L+1},$$

Эти уравнения описывают $L$–1 межзвенных обменов и два обмена с СД (прием и выдача информации).

К сожалению, предложенные ранее [8-10] алгоритмы синтеза наблюдаемой и управляемой диагностической модели не обладают достаточной общностью. Действительно, эти алгоритмы обслуживают только две следующие ситуации: модель с независимыми цепями и модель с одной точкой слияния. Таким образом, вне рассмотрения оказались ситуации, когда точек слияния более одной. Вопросы о том, как производить синтез в подобных случаях и сколько точек слияния рекомендуется определить, остаются открытыми и рассматриваются в настоящем докладе.

# 3. Условия наблюдаемости и управляемости параллельной модели при наличии в ней более одной точки слияния

В докладе используется логика доказательства, примененная в [9, 10], которая состоит в следующем. Сначала указывается на возможность перехода в рассматриваемом случае от периодически нестационарной системы к стационарной. Эта возможность возникает, прежде всего, из-за того, что как в случае модели с независимыми цепями, так и в случае модели со слиянием цепей есть возможность перехода от описания РВС посредством асинхронной модели к описанию посредством синхронной последовательной модели.

*Утверждение 1* [10]. Для любой синхронной периодически нестационарной системы $S^{\mathrm{m}}$, которая:

– состоит из p скалярных цепей, сходящихся в одном скалярном звене $(h_0, f_0, g_0)$ размерности $m_0$, при этом l-я цепь содержит $L_l$ звеньев $\{(h_{l,i}, f_{l,i}, g_{l,i}) \mid i = \overline{1, L_l}\}, \quad l = \overline{1, p}$;

– описывается моделью:

(2)
$$x(t+1) = F(\gamma_{\mathrm{r}}(j))x(t) + G(\gamma_r(j))u(t), y(t) = H(\gamma_r(j))x(t)$$
$$j = \overline{1, L_\Sigma + 1}, L_\Sigma = 1 + \sum_{l=1}^{p} L_l ,$$

– имеет на периоде функционирования один сеанс приема информации от СД, описываемый для некоторой последовательности $\gamma_{\mathrm{r}}$ матрицами $F(\gamma_r(L_\Sigma+1))$, $G(\gamma_r(L_\Sigma+1))$, $H(\gamma_r(L_\Sigma+1))$, и один сеанс выдачи информации в СД, описываемый матрицами $F(\gamma_r(L_\Sigma)), G(\gamma_r(L_\Sigma)), H(\gamma_r(L_\Sigma))$, существует синхронная стационарная система $\widehat{S}^m$

(3) $$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad y(k) = Cx(k),$$

которая при любой входной последовательности формирует выходные последовательности, совпадающие с выходными последовательностями системы $S^{\mathrm{m}}$ на $\gamma_r$. При этом $k$ – периоды системы (2), $A = F_{\Pi}(\gamma_r) = \prod_{i=1}^{L_\Sigma+1} F(\gamma_r(L_\Sigma - i + 2)), \quad B = G(\gamma_r(L_\Sigma+1))$,

$C = H(\gamma_r(L_\Sigma))F^{-1}(\gamma_r(L_\Sigma))F^{-1}(\gamma_r(L_\Sigma+1))A = H(\gamma_r(L_\Sigma))A$.

Затем доказывается, что для наблюдаемости стационарной системы необходимо и достаточно, чтобы размерность векторного пространства ее выходных последовательностей системы равнялась бы размерности ее пространства состояний.

*Утверждение 2* [9]. Чтобы стационарная неособенная автономная линейная система размерности *n* со скалярным выходом была наблюдаема необходимо и достаточно, чтобы размерность пространства выходных последовательностей была равна *n*.

Основываясь на этом факте, доказываются достаточные условия наблюдаемости стационарной модели со слияния цепей.

Ниже рассматриваются стационарные модели $\hat{S}^m$, состоящие из трех базовых структурных элементов - цепи, структуры со слиянием цепей и иерархической структуры. Здесь $C(i, v_i)$ обозначает *i*-ю цепь из $v_i$ звеньев, а $M_0$ – звено слияния, $\{S_i \mid i = \overline{1, q}\}$ – подсистемы, выходная информация которых перерабатывается звеном слияния M0. Каждая из подсистем $S_i$ может представлять из себя либо цепь $C(i, v_i)$, либо структуру со слиянием $p_i$ цепей $\overline{S}_i(C(1, v_1), C(2, v_2), \ldots, C(p_i, v_{p_i}), M_0^i)$.

В докладе показывается справедливость следующих утверждений в отношении стационарной динамической системы $\widehat{S}^m$, полученной в результате преобразования периодически нестационарной $S^m$.

*Утверждение 3*. Иерархическая стационарная структура $\widehat{S}^h$, состоящая из наблюдаемых и управляемых скалярных подсистем $\{S_k \mid k = \overline{1, q}\}$, наблюдаема и управляема, если взаимно просты все многочлены из следующего множества: характеристические многочлены $\{\varphi_k \mid k = \overline{1, q}\}$ подсистем, характеристический многочлен $\varphi_0$ и многочлены $\{c_k \mid k = \overline{1, q}\}$ числителей передаточных функций $\{J_k \mid k = \overline{1, q}\}$ звена слияния $M_0^h$.

Для получения условий наблюдаемости и управляемости любой периодически нестационарной системы со слиянием цепей $\widehat{S}^m$ доказываются теперь уже достаточно очевидные утверждения.

*Утверждение 4.* Если система (3) наблюдаема (управляема), то система (2) $\gamma_{\text{r}}$-наблюдаема ($\gamma_{\text{r}}$-управляема).

*Утверждение 5*. Если периодически нестационарная система $S^{\text{m}}$ $\gamma_{\text{r}}$-наблюдаема и $\gamma_{\text{r}}$-управляема, и все матрицы динамики этой цепи неособенные, то она полностью наблюдаема и управляема.

## 4. Заключение

В настоящем докладе рассмотрены вопросы синтеза дискретно-событийной диагностической модели распределенной вычислительной системы реального времени. Модель реализуется в виде набора дискретных динамических периодически нестационарных систем. Если в первой части статьи эти системы соответствуют отдельным вычислительным путям из множества, составляющего покрытие ребер графа информационных связей диагностируемой системы, то во второй части некоторые из этих систем могут соответствовать не отдельным путям, а подмножествам путей из покрывающего множества. Изложенные выше результаты дают возможность получения более рациональных версий модели с точки зрения объема передаваемой диагностической информации. Для этих версий формулируются достаточные условия наблюдаемости и управляемости.

## Список литературы

1. Patton R. J, Frank P M, Clark R. N. Issues in fault diagnosis for dynamic systems. London: Springer, 2000. 597 p.
2. Isermann R. Fault Diagnosis Application. Heidelberg: Springer, 2011. 354 p.
3. Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В. Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. 185 с.
4. Gruzlikov A.M., Kolesov N.V., Lukoyanov E.V., Tolmacheva M.V. Test-based diagnosis of distributed computer system using a time-varying model // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, No. 24. P. 1075-1082.
5. Грузликов А.М., Колесов Н.В., Лукоянов Е.В. Тестовое диагностирование нарушений адресации информационных обменов в вычислительных системах с использованием параллельной модели // Известия РАН. Теория и системы управления. 2018. № 3. С. 76-89.
6. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to Discrete Event Systems. Second Edition. New York: Springer, 2007. 770 p.
7. Zaytoon J., Lafortune S. Overview of Fault Diagnosis Methods for Discrete Event Systems // Annual Reviews in Control. 2013. Vol. 37. P. 308-320.
8. Gruzlikov A., Kolesov N., Tolmacheva M. Event monitoring of parallel computations // Int. J. Applied Mathematics and Computer Science. 2015. Vol. 25, No. 2. P. 311-321.
9. Грузликов А.М., Колесов Н.В. Дискретно-событийная диагностическая модель распределенной вычислительной системы. Независимые цепи // Автоматика и телемеханика. 2016. № 10. С. 140-155.
10. Грузликов А.М., Колесов Н.В. Дискретно-событийная диагностическая модель распределенной вычислительной системы. Слияние цепей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 4. С. 126-134.