

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-3>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/106TVN316.pdf>

Статья опубликована 29.06.2016.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Зотов И.В., Мое Мин Вин, Тейн Тун Ньюнт Организация оперативного межмодульного контроля в отказоустойчивых логических мультиконтроллерах // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №3 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/106TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**УДК 004.272.3+004.052.2**

**Зотов Игорь Валерьевич**

ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», Россия, Курск<sup>1</sup>  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: [zotovigor@yandex.ru](mailto:zotovigor@yandex.ru)  
РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_items.asp?authorid=101596](http://elibrary.ru/author_items.asp?authorid=101596)  
ResecherID: <http://www.researcherid.com/rid/G-4777-2013>

**Мое Мин Вин**

ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», Россия, Курск  
Аспирант  
E-mail: [htunnyunt@mail.ru](mailto:htunnyunt@mail.ru)

**Тейн Тун Ньюнт**

ФГБОУ ВО «Юго-западный государственный университет», Россия, Курск  
Аспирант  
E-mail: [htunnyunt@mail.ru](mailto:htunnyunt@mail.ru)

## **Организация оперативного межмодульного контроля в отказоустойчивых логических мультиконтроллерах**

**Аннотация.** В статье рассмотрена задача организации встроенного контроля матричных логических мультиконтроллеров с целью оперативного выявления отказов модулей. Изложен новый подход к организации контроля на основе комбинации самоконтроля и взаимоконтроля, выполняемого соседними модулями данного модуля в мультиплексном режиме, позволяющий повысить вероятность обнаружения отказов. Определены правила формирования множеств контролирующих и контролируемых соседей каждого модуля, инвариантные к расположению модуля в пределах топологической структуры мультиконтроллера и к ее размерности. Показано, что в отличие от механизма взаимоконтроля, одно и то же множество контролирующих соседей попеременно используется для проверки двух модулей, в мультиплексном режиме, а результат контроля модуля формируется путем применения мажоритарной операции к признакам, полученным всеми контролируемыми соседями, а также самим контролируемым модулем в ходе его самоконтроля. Приведены формулы для определения числа контролирующих соседей у каждого модуля в зависимости от размерности мультиконтроллера. Выполнена оценка вероятности обнаружения отказов модулей при использовании предлагаемого подхода, исследованы ее зависимости от размерности мультиконтроллера и надежности отдельных контролирующих блоков. Показано, что во всех практически значимых случаях предлагаемый

---

<sup>1</sup> 305040, Россия, Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94

подход обеспечивает более высокую вероятность обнаружения отказов по сравнению с межмодульным взаимоконтролем и самоконтролем.

**Ключевые слова:** система логического управления; логический мультиконтроллер; матричная структура; параллелизм; надежность; отказоустойчивость; локальный отказ; встроенный контроль; аппаратный контроль; мажоритарная операция

## Введение

Матричные логические мультиконтроллеры (ЛМК) являются перспективным базисом для реализации встраиваемых параллельных систем логического управления [1]. Они способны решать задачи управления сложными объектами и процессами, как дискретного, так и непрерывного характера. Одна из ключевых задач создания и эксплуатации ЛМК – обеспечение их отказоустойчивости. Особую остроту эта задача приобретает в тех случаях, когда непрерывная корректная работа объекта управления имеет критическое значение. В современных мультиконтроллерах решение этой задачи достигается либо введением режима деградации производительности, при котором дефектные (отказавшие) модули исключаются из структуры ЛМК, либо использованием режима живучести, при котором дефектные (отказавшие) модули оперативно заменяются резервными. В обоих режимах происходит автоматическое перераспределение выполняемых программ управления на множестве работоспособных модулей и мультиконтроллер продолжает функционировать согласно исходному алгоритму с последней пройденной контрольной точки.

Задачи повышения надежности и обеспечения отказоустойчивости логических мультиконтроллеров, а также аналогичных распределенных систем более широкого класса (включая СБИС-системы), находятся в центре внимания российских и зарубежных ученых уже длительный отрезок времени. Глубоко проработан вопрос реализации оперативной реконфигурации логической структуры ЛМК при возникновении отказов, разработаны распределенные алгоритмы и реализующие их аппаратные средства управления реконфигурацией [2-4], предложены подходы к решению задачи отказоустойчивого размещения и переразмещения управляющих алгоритмов в ЛМК [5, 6], разработан ряд алгоритмов управления передачей данных (управляющих сигналов) в коммуникационной среде ЛМК в условиях наличия отказов и дефектов [7-9]. В то же время имеется ряд задач, приемлемое решение которых на данный момент не найдено. Такой задачей является, в частности, оперативное выявление отказавших модулей (локальных отказов) мультиконтроллера. Без ее эффективного решения использование имеющихся методов и средств реконфигурации логической структуры ЛМК и отказоустойчивого управления передачей данных (управляющих сигналов) становится практически невозможным.

В настоящее время оперативная локализация отказов в логических мультиконтроллерах осуществляется с использованием методов аппаратного самоконтроля и межмодульного аппаратного взаимоконтроля. Аппаратный самоконтроль [10-13] относительно прост в реализации, однако часто не обеспечивает достаточную вероятность обнаружения отказов из-за ненадежности контролируемых аппаратных средств и ограничений алгоритма самоконтроля. При межмодульном взаимоконтроле [14-16] каждый модуль ЛМК одновременно проверяется несколькими соседними модулями (контролируемыми соседями) в структуре мультиконтроллера и решение о его неработоспособности выносится методом «голосования» с использованием мажоритарной операции. Это позволяет уменьшить зависимость результата контроля от ненадежности контролируемых аппаратных средств, тем самым повышая вероятность обнаружения отказов. Однако в большинстве практически значимых случаев взаимоконтроль обеспечивает лишь 10-

процентное повышение вероятности обнаружения отказов при значительной аппаратной избыточности [17], что объясняется неэффективным использованием ресурса контролирующих соседей в матрице ЛМК. Таким образом, существует противоречие, заключающееся в том, что, с одной стороны, необходимо получение достоверных данных о текущем распределении локальных отказов в физической структуре мультиконтроллера с целью оперативной реакции на отказ, а с другой стороны, существующие методы контроля мультиконтроллеров не обеспечивают достаточную вероятность обнаружения отказов при ограничении на аппаратную избыточность ЛМК.

В данной статье предлагается новый подход к организации оперативного аппаратного контроля логических мультиконтроллеров, сочетающий свойства межмодульного взаимоконтроля и традиционного механизма самоконтроля. Предлагаемый подход обеспечивает дальнейшее повышение достоверности выявления отказов в ЛМК по сравнению с межмодульным взаимоконтролем при относительно небольшом увеличении структурной избыточности контролирующих аппаратных средств.

### **Сущность предлагаемого подхода к организации контроля логических мультиконтроллеров**

Предлагаемый подход к организации контроля ЛМК, названный комбинированным мультиплексным межмодульным контролем, является развитием механизма распределенного взаимоконтроля, описанного в работах [14-16]. Его сущность заключается в схемном контроле каждого модуля (контроллера) несколькими его соседями (далее – контролирующие соседи) в топологической структуре мультиконтроллера в комбинации с самоконтролем. Предполагается, что самоконтроль модуля и его контроль со стороны соседей выполняются по одному и тому же алгоритму. В отличие от механизма взаимоконтроля, одно и то же множество контролирующих соседей попеременно используется для проверки двух модулей, в мультиплексном режиме. Результат контроля модуля формируется путем применения мажоритарной операции к значениям (признакам), полученным всеми контролирующими соседями, а также самим контролируемым модулем в ходе его самоконтроля. При такой организации контроля каждый модуль одновременно проверяет себя и нескольких своих соседей (непосредственных или косвенных). С другой стороны, каждый модуль контролируется сразу несколькими соседними модулями и самим собой. Процесс контроля модулей протекает параллельно во времени, при этом сигнал о переходе модуля в неработоспособное состояние одновременно передается всем его непосредственным соседям, что позволяет оперативно ввести запрет на передачу данных или управляющих сигналов через отказавший модуль.

Основным преимуществом комбинированного мультиплексного контроля перед взаимоконтролем является более высокая достоверность контроля, обусловленная увеличением числа контролирующих соседей у каждого модуля. При этом имеет место незначительное повышение структурной избыточности ЛМК, поскольку каждый блок контроля каждого модуля проверяет два соседних модуля в мультиплексном режиме. Аналогично взаимоконтролю, комбинированный мультиплексный контроль обеспечивает сохранение конструктивной однородности, распределенности и децентрализованности ЛМК, а, следовательно, и масштабируемости мультиконтроллера при добавлении новых модулей. Он также позволяет косвенно проверять работоспособность самих блоков контроля, а также исключает необходимость обмена признаками состояния контролируемых модулей через коммуникационную среду, что положительно сказывается на ее пропускной способности.

### Правила определения множеств контролирующих и контролируемых соседей

Ключевой задачей организации комбинированного мультиплексного межмодульного контроля в ЛМК является назначение множеств контролирующих и контролируемых соседей для каждого модуля.

Первоначально определим правила формирования указанных множеств для случая двумерной матричной топологии ЛМК.

Пусть  $U = \{u_{xy}\}$  – множество модулей мультиконтроллера, где  $x$  и  $y$  – координаты (индексы) модуля в матрице соответственно по горизонтали и вертикали, отсчитываемые от ее левого нижнего угла,  $x = \overline{0, n-1}$ ,  $y = \overline{0, m-1}$ ,  $m$  и  $n$  – число строк и столбцов матрицы, соответственно. Тогда множество контролирующих соседей  $K_{xy}$  произвольного модуля  $u_{xy}$ ,  $x \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ ,  $y \in \{0, 1, \dots, m-1\}$ , будет определяться согласно следующему правилу:

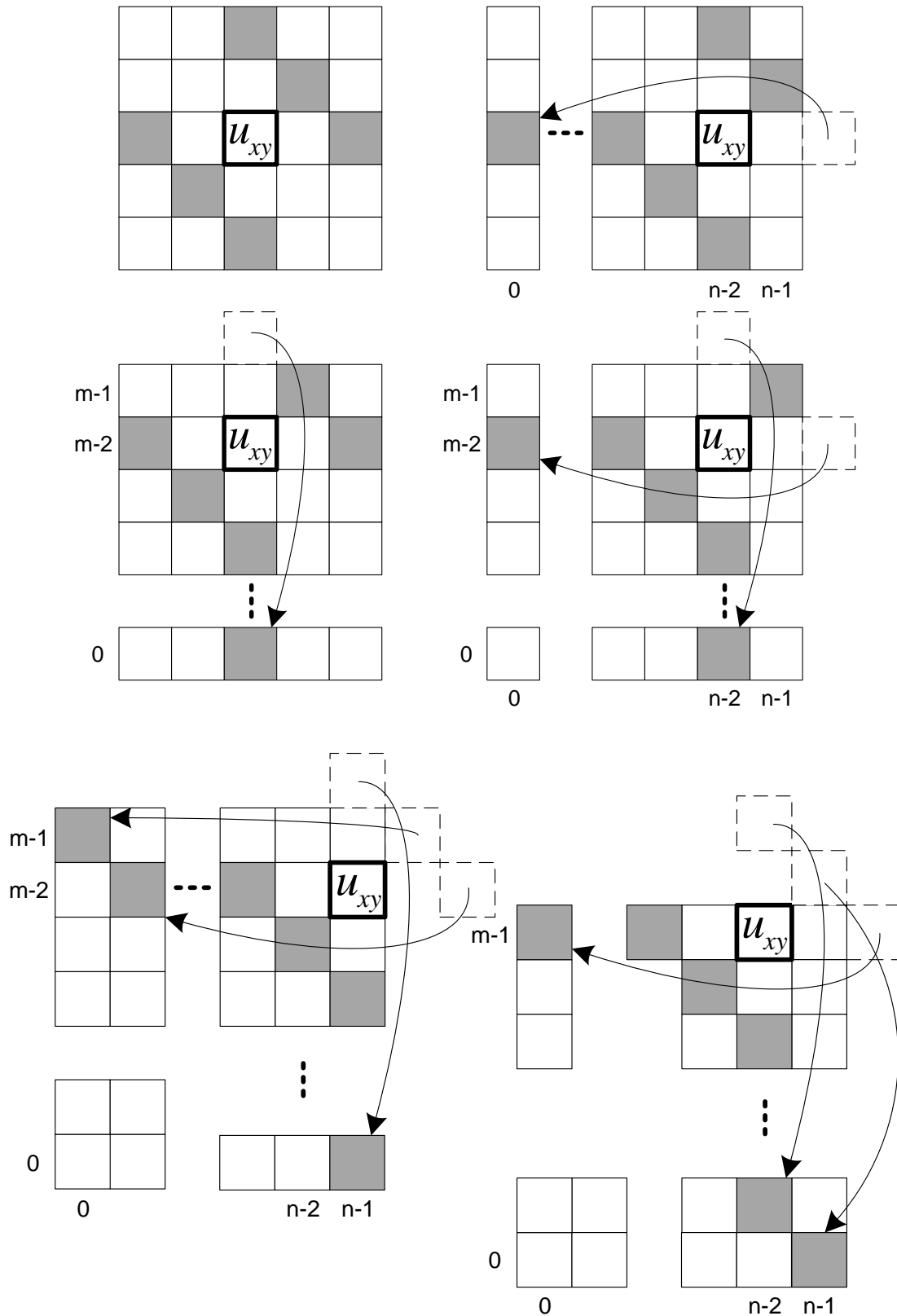
$$K_{xy} = \left\{ \begin{array}{l} u_{x, (y+2) \bmod m}, u_{(x+1) \bmod n, (y+1) \bmod m}, u_{(x+2) \bmod n, y}, \\ u_{x + ((1 - \text{sign}(x)) + (1 - \text{sign}(x-1)))n - 2, y}, \\ u_{x + (1 - \text{sign}(x))n - 1, y + (1 - \text{sign}(y))m - 1}, \\ u_{x, y + ((1 - \text{sign}(y)) + (1 - \text{sign}(y-1)))m - 2} \end{array} \right\}. \quad (1)$$

Учитывая, что модуль  $u_{xy}$  осуществляет самоконтроль, полное множество модулей, проверяющих  $u_{xy}$ , будет определяться в виде:

$$K'_{xy} = K_{xy} \cup \{u_{xy}\}. \quad (2)$$

Рис. 1 иллюстрирует правило (1) формирования множества  $K_{xy}$  для различных случаев расположения контролируемого модуля  $u_{xy}$  в матрице мультиконтроллера. На этом рисунке каждая клетка соответствует модулю ЛМК, контролирующие соседи выделены серым фоном, пунктиром показаны отсутствующие контролирующие соседи, которые заменяются соответствующими модулями с противоположных сторон матрицы (стрелки показывают варианты такой замены). Из приведенных иллюстраций видно, что предлагаемый подход применим в тех случаях, когда  $m \geq 5$  и  $n \geq 5$ .

Множество модулей  $C_{xy}$ , контролируемых модулем  $u_{xy}$ ,  $x \in \{0, 1, \dots, n-1\}$ ,  $y \in \{0, 1, \dots, m-1\}$ , формально совпадает с множеством  $K_{xy}$ . Однако, оно включает два подмножества модулей,  $C_{xy}^1$  и  $C_{xy}^2$ , проверка которых производится в разные моменты времени одними и теми же блоками контроля (в мультиплексном режиме):



**Рисунок 1.** Иллюстрация правила формирования множества контролирующих соседей  $K_{xy}$  в двумерном ЛМК

$$C_{xy}^1 = \left\{ u_{x,(y+2) \bmod m}, u_{(x+1) \bmod n, (y+1) \bmod m}, u_{(x+2) \bmod n, y} \right\}, \quad (3)$$

$$C_{xy}^2 = \left\{ \begin{array}{l} u_{x+((1-\text{sign}(x))+1-\text{sign}(x-1))n-2, y}, \\ u_{x+(1-\text{sign}(x))n-1, y+(1-\text{sign}(y))m-1}, \\ u_{x, y+((1-\text{sign}(y))+1-\text{sign}(y-1))m-2} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Временной интервал проверки модулей множества  $C_{xy}^1$  условно именуется фазой 1, модули множества  $C_{xy}^2$  контролируются в фазе 2.

Между модулями множеств  $C_{xy}^1$  и  $C_{xy}^2$  устанавливается взаимно-однозначное соответствие:

$$\Phi_{xy} = \left[ \begin{array}{l} u_{x,(y+2) \bmod m} \leftrightarrow u_{x+((1-\text{sign}(x))+1-\text{sign}(x-1))n-2, y} \\ u_{(x+1) \bmod n, (y+1) \bmod m} \leftrightarrow u_{x+(1-\text{sign}(x))n-1, y+(1-\text{sign}(y))m-1} \\ u_{(x+2) \bmod n, y} \leftrightarrow u_{x, y+((1-\text{sign}(y))+1-\text{sign}(y-1))m-2} \end{array} \right]. \quad (5)$$

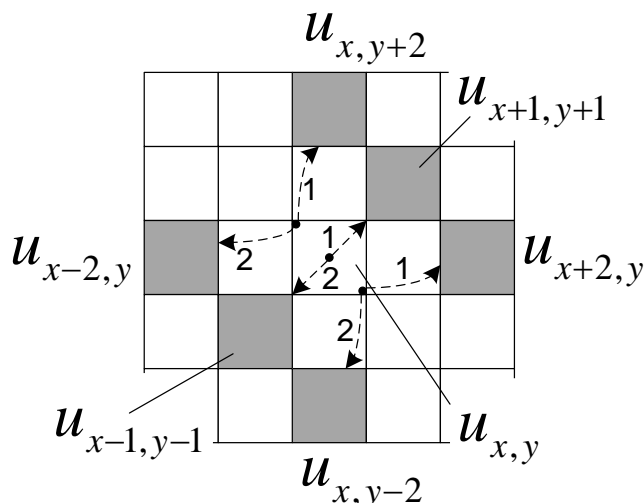
Соответствие (5) определяет, какие из контролируемых соседей проверяются одним и тем же блоком контроля модуля  $u_{xy}$  (в мультиплексном режиме). Правило формирования множества  $C_{xy}$  с учетом его разбиения на подмножества иллюстрируется рисунком 2. Здесь черными точками условно отображены блоки контроля модуля  $u_{xy}$ , пунктирные стрелки от которых показывают, какие из соседей проверяются этими блоками. Цифры рядом с пунктирными стрелками отображают номера фаз контроля соседей.

Аналогичным образом можно записать выражения для формирования множеств контролирующих и контролируемых соседей в  $d$ -мерной матрице  $K_{x_1 x_2 \dots x_d}$ ,  $C_{x_1 x_2 \dots x_d}^1$ ,  $C_{x_1 x_2 \dots x_d}^2$  и задать соответствие  $\Phi_{x_1 x_2 \dots x_d}$ .

Несложно показать, что

$$|K_{x_1 x_2 \dots x_d}| = 2[d(d-1) + 1], \quad (6)$$

$$|K'_{x_1 x_2 \dots x_d}| = |K_{x_1 x_2 \dots x_d}| + 1 = 2d(d-1) + 3. \quad (7)$$



**Рисунок 2.** Иллюстрация правила формирования множества контролируемых соседей  $C_{xy}$  в двумерном ЛМК

Согласно выражению (7) число контролирующих модулей у каждого контроллера (с учетом его самого) будет нечетным, что позволяет формировать результирующий сигнал об отказе мажоритарной операцией над сигналами от всех контролирующих модулей независимо от размерности матрицы. Заметим, что по сравнению с механизмом взаимоконтроля число контролирующих соседей у каждого модуля увеличивается в 2 раза. Так, в двумерной матрице  $|K'_{xy}| = 7$ , в трехмерной матрице  $|K'_{xyz}| = 15$ , и т.д.

### Оценка вероятности обнаружения локальных отказов при использовании предлагаемого подхода

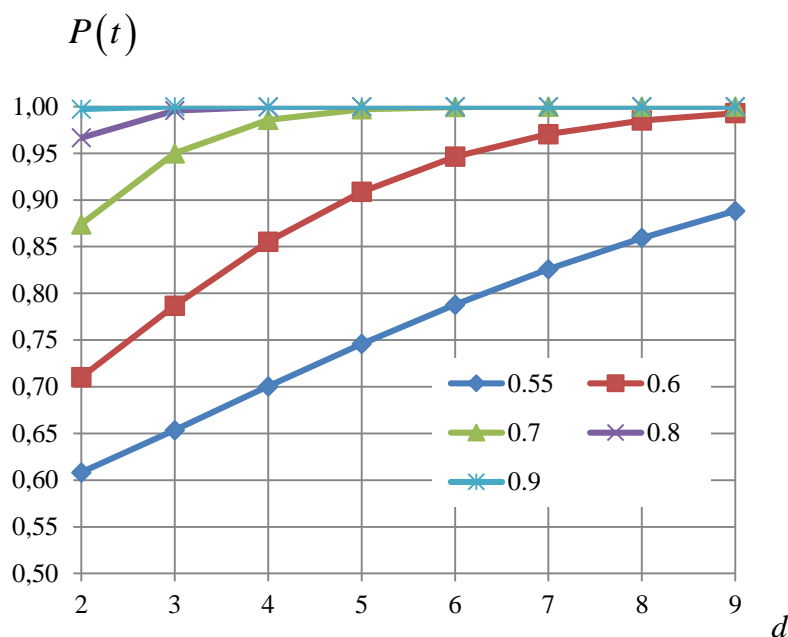
В ходе проведенных авторами исследований была выведена общая формула для определения вероятности обнаружения локального отказа в  $d$ -мерном ЛМК при использовании комбинированного мультиплексного контроля:

$$P(t) = \sum_{i=\lfloor \frac{2d(d-1)+3}{2} \rfloor}^{2d(d-1)+3} C_{2d(d-1)+3}^i \pi(t)^i [1 - \pi(t)]^{2d(d-1)-i+3}, \quad (8)$$

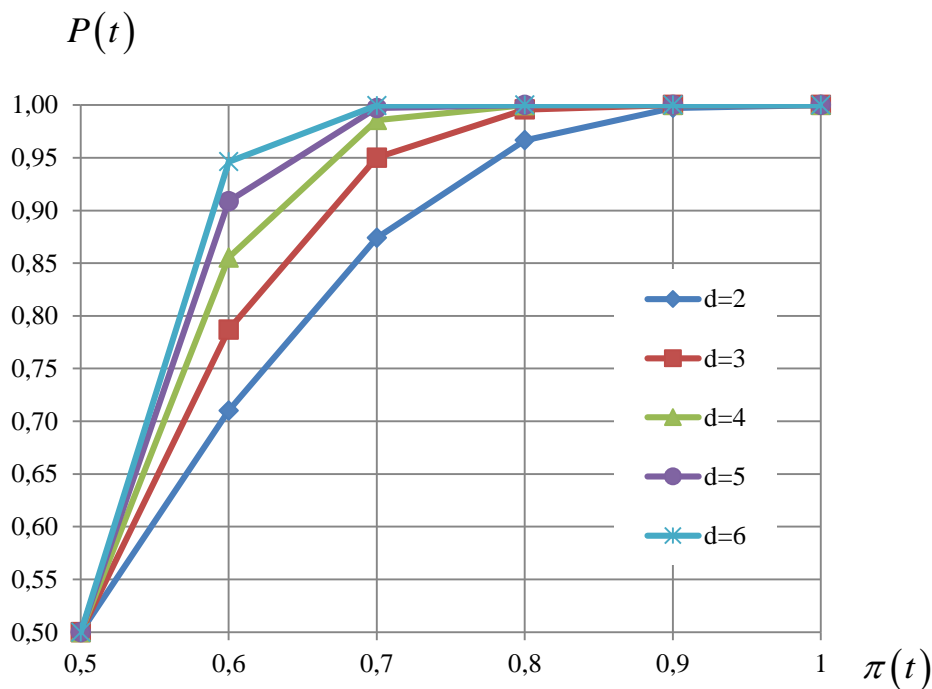
где:  $C_N^M$  – число сочетаний из  $N$  по  $M$ ;  $\pi(t)$  – вероятность обнаружения отказа одним блоком контроля (самоконтроля).

Выражение (8) позволяет проанализировать зависимости вероятности обнаружения локальных отказов от размерности мультиконтроллера и надежности средств контроля, а также сопоставить их с аналогичными зависимостями, характерными для других методов контроля, например, межмодульного взаимоконтроля.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости вероятности  $P$  от размерности мультиконтроллера  $d$  для фиксированных значений  $\pi(t) \in \{0.55, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9\}$  и от вероятности  $\pi(t)$  для фиксированных значений  $d \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$  соответственно.



**Рисунок 3.** Графики зависимости вероятности  $P(t)$  от размерности ЛМК  $d$  при фиксированных значениях вероятности  $\pi(t)$



**Рисунок 4.** Графики зависимости вероятности  $P(t)$  от вероятности  $\pi(t)$  при фиксированной размерности ЛМК  $d$

Графики, изображенные на рис. 3 и рис. 4, позволили выявить следующие закономерности.

1. Вероятность обнаружения локальных отказов  $P(t)$  значительно увеличивается с ростом размерности ЛМК  $d$ , что обусловлено квадратичной зависимостью числа контролируемых модулей от  $d$  у каждого контроллера. При этом рост вероятности  $P(t)$



более резкий, чем в случае межмодульного взаимоконтроля [17], что связано с наличием множителя 2 в формуле (7).

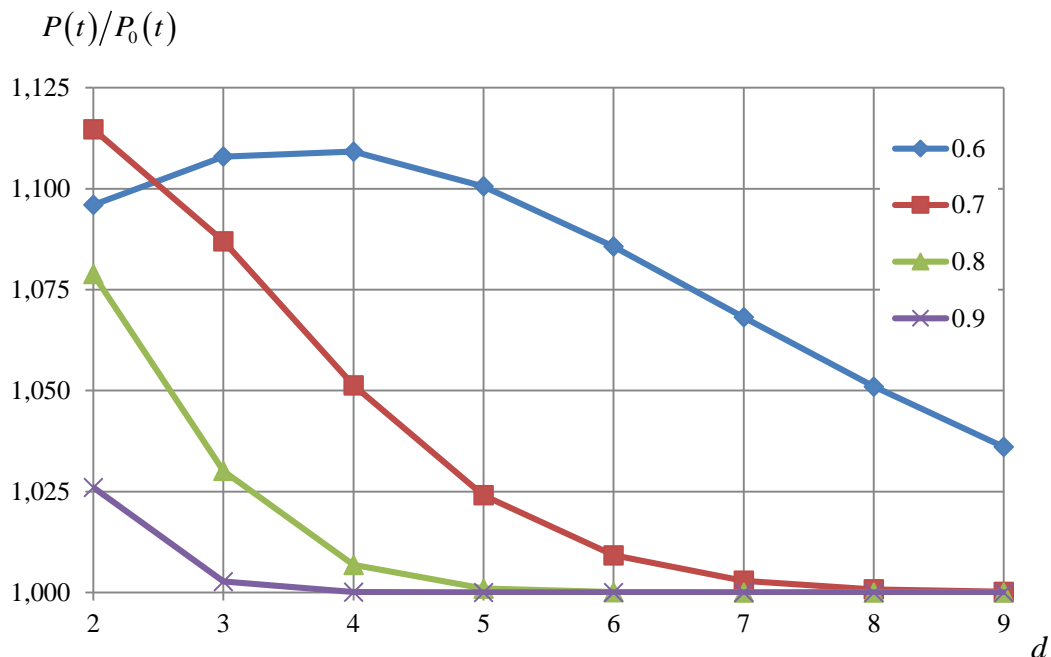
2. Вероятность обнаружения локальных отказов  $P(t)$  значительно быстрее устремляется к единице по сравнению с вероятностью  $\pi(t)$ , причем тем быстрее, чем больше сама вероятность  $\pi(t)$ . Например, в двухмерном ЛМК при  $\pi(t)=0,7$  вероятность  $P(t)$  возрастает примерно до 0,87, т.е. повышается в 1,24 раза. В трехмерном ЛМК при  $\pi(t)=0,7$  получаем уже  $P(t) \approx 0,95$ , т.е. вероятность обнаружения отказа увеличивается почти в 1,36 раза.

*Замечание.* Отмеченные выше закономерности справедливы только при  $\pi(t) > 0,5$ . При  $\pi(t) = 0,5$  имеем  $P(t) = 0,5$ , следовательно, комбинированный мультиплексный контроль не дает никакого эффекта. При  $\pi(t) < 0,5$  имеет место деградация вероятности обнаружения локальных отказов ( $P(t) < \pi(t) < 0,5$ ), поэтому в дальнейшем будем считать, что  $\pi(t) > 0,5$ , т.е. каждый блок контроля в отдельности способен обнаруживать отказы более, чем в 50% случаев.

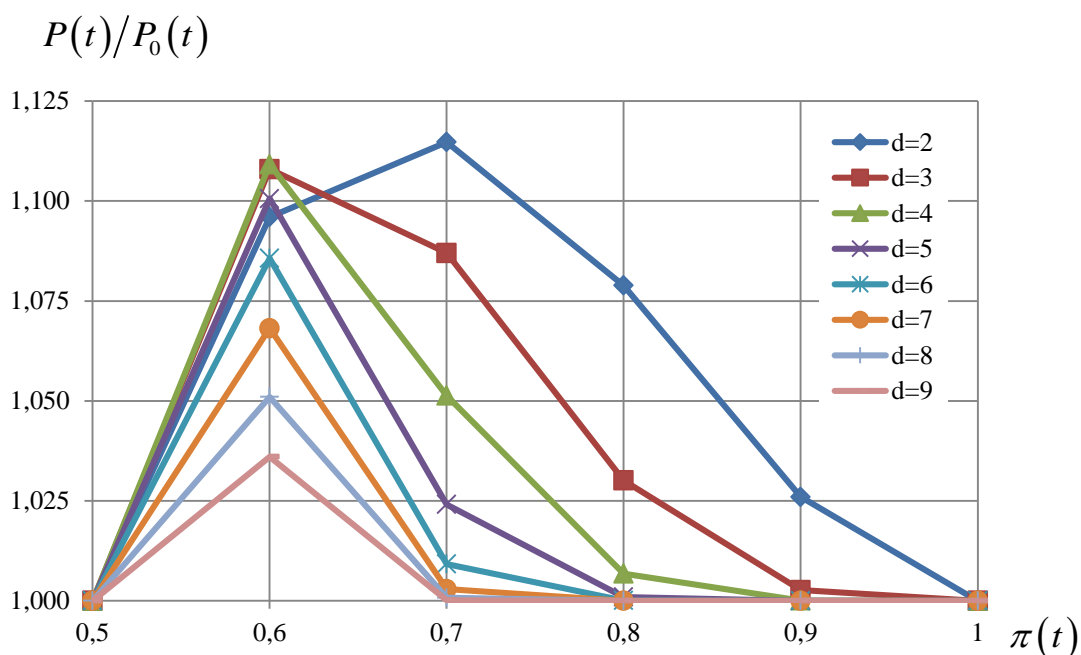
Используя выражение (8), оценим преимущества предлагаемого подхода к организации контроля перед межмодульным взаимоконтролем. Обозначим через  $P_0(t)$  вероятность обнаружения локального отказа, обеспечиваемую межмодульным взаимоконтролем (в редакции авторов данного метода она называется вероятностью правильной локализации отказа [14-16]). Исследуем зависимости отношения вероятностей  $P(t)$  и  $P_0(t)$  от размерности мультиконтроллера  $d$  и от вероятности  $\pi(t)$  при нескольких фиксированных значениях  $\pi(t)$  и  $d$  соответственно. Графики указанных зависимостей изображены на рис. 5 и рис.6 соответственно.

Анализ зависимостей, представленных на рис. 5 и рис.6, показывает, что предлагаемый подход существенно превосходит метод межмодульного взаимоконтроля в мультиконтроллерах невысокой размерности ( $2 \leq d \leq 3$ ). Причем наибольший эффект отмечается при  $0,6 \leq \pi(t) \leq 0,7$ . Максимальное повышение вероятности обнаружения локальных отказов по сравнению с взаимоконтролем достигается при  $\pi(t) = 0,7$  и  $d = 2$  и составляет почти 11,5%. В трехмерном ЛМК наибольший рост указанной вероятности обеспечивается при  $\pi(t) = 0,6$  и составляет более 10,9%. С повышением размерности ЛМК и вероятности  $\pi(t)$  преимущество комбинированного мультиплексного контроля перед межмодульным взаимоконтролем снижается. Так, например, в 4-мерном ЛМК при  $\pi(t) = 0,7$  предлагаемый подход обеспечивает повышение вероятности обнаружения локальных отказов примерно на 5%, а при  $\pi(t) = 0,8$  – только на 0,68%. При  $d \geq 5$  предлагаемый подход имеет преимущество лишь в узком диапазоне значений вероятности

$\pi(t)$ . При  $\pi(t) \geq 0,7$  рост вероятности обнаружения локальных отказов не превышает 2,5%.



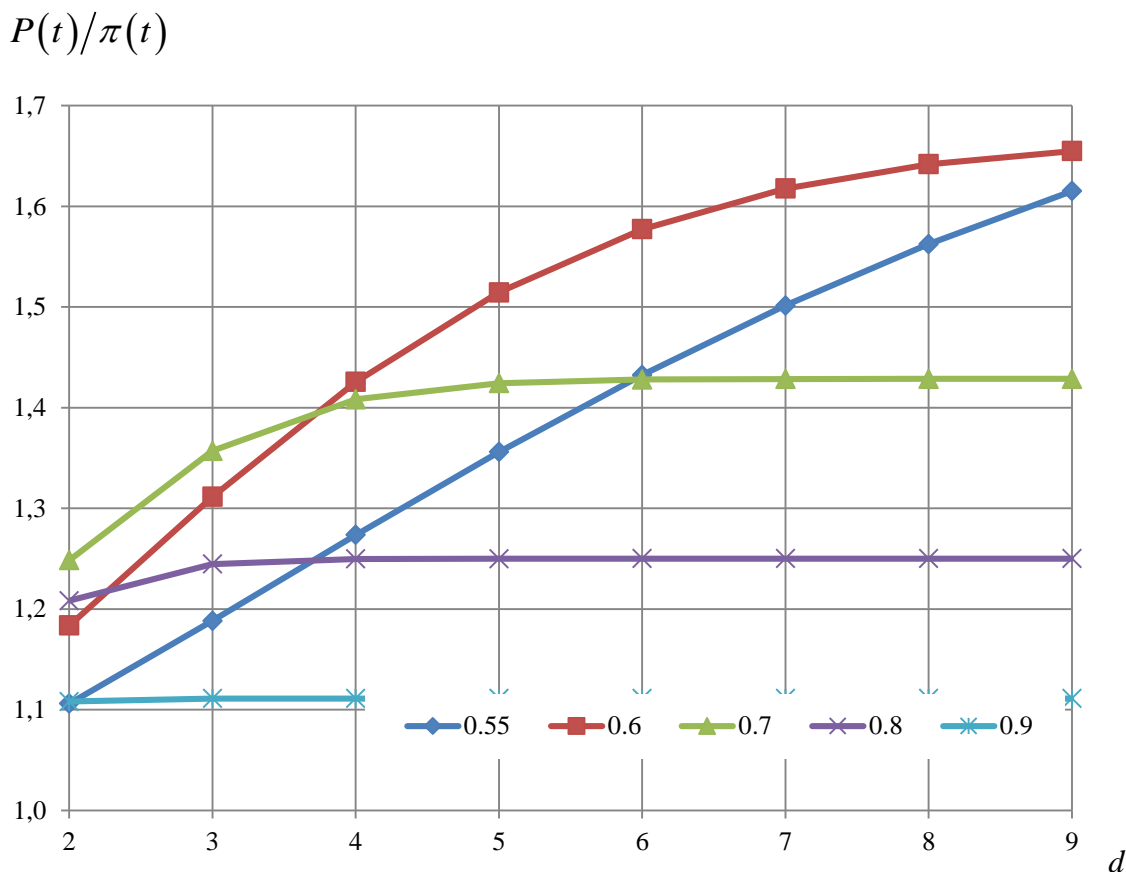
**Рисунок 5.** Графики зависимости отношения  $P(t)/P_0(t)$  от размерности мультиконтроллера  $d$  при фиксированной вероятности  $\pi(t)$



**Рисунок 6.** Графики зависимости отношения  $P(t)/P_0(t)$  от вероятности  $\pi(t)$  при фиксированной размерности мультиконтроллера  $d$

Используя выражение (8), можно также оценить преимущества предлагаемого подхода к организации контроля перед традиционным самоконтролем. Будем считать, что вероятность обнаружения отказа при самоконтроле есть  $\pi(t)$  (процедуры контроля соседа и

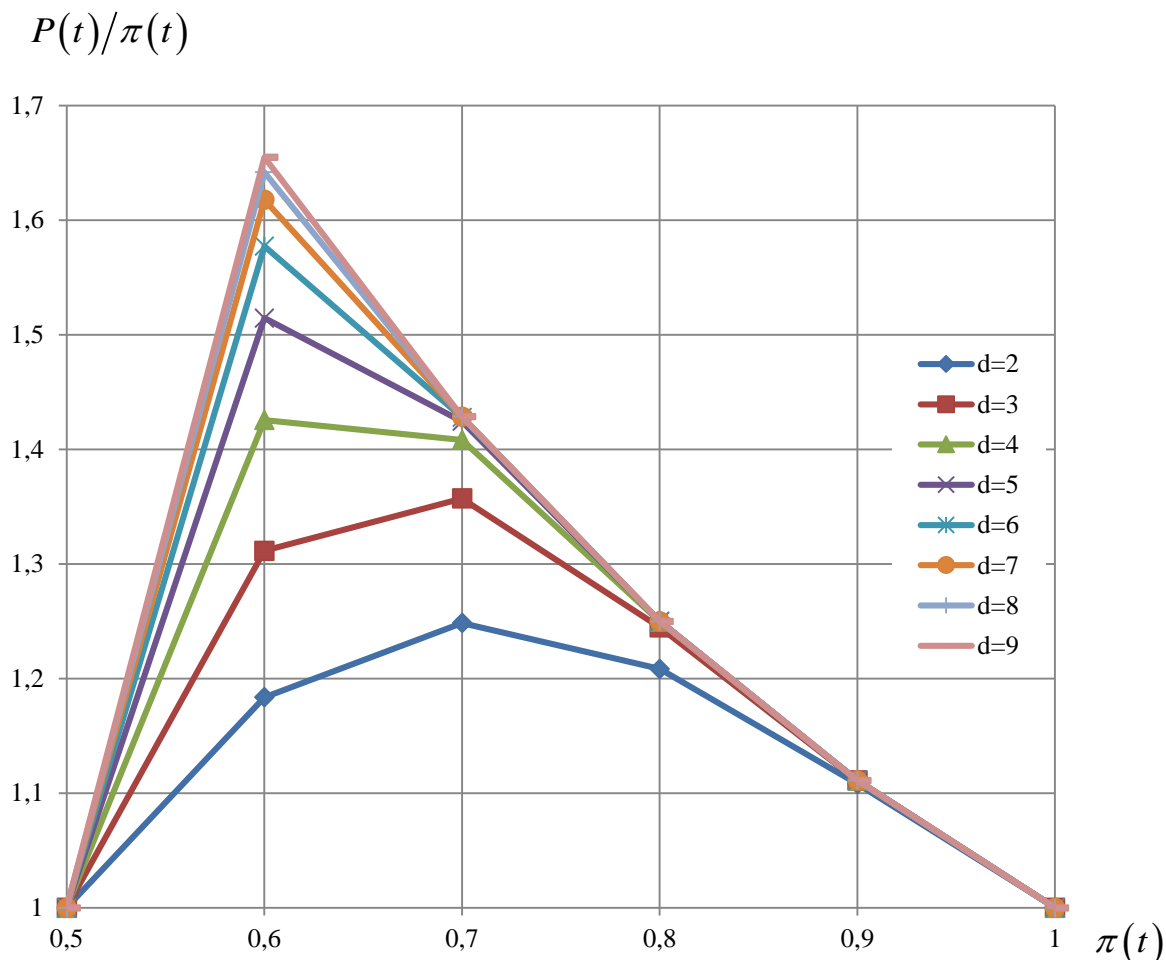
самоконтроля идентичны). Исследуем зависимости отношения вероятностей  $P(t)/\pi(t)$  от размерности мультиконтроллера  $d$  и от вероятности  $\pi(t)$  при нескольких фиксированных значениях  $\pi(t)$  и  $d$  соответственно. Указанные зависимости представлены на рис. 7 и рис. 8 соответственно.



**Рисунок 7.** Графики зависимости отношения  $P(t)/\pi(t)$  от размерности мультиконтроллера  $d$  при фиксированной вероятности  $\pi(t)$

Анализ полученных зависимостей (рис. 7 и рис. 8) показывает, что минимальные преимущества предлагаемого подхода перед самоконтролем достигаются в двумерных ЛМК: при  $\pi(t) = 0.9$   $P(t)/\pi(t) \approx 1.108$ , при  $\pi(t) = 0.8$   $P(t)/\pi(t) \approx 1.245$ , при  $\pi(t) = 0.7$   $P(t)/\pi(t) \approx 1.357$ , при  $\pi(t) = 0.6$   $P(t)/\pi(t) \approx 1.184$ , при  $\pi(t) = 0.55$   $P(t)/\pi(t) \approx 1.108$ . Также из исследуемых зависимостей видно, что при высокой надежности отдельных блоков контроля, т.е. когда  $\pi(t) \geq 0.9$ , отношение вероятностей  $P(t)/\pi(t)$  практически не зависит от размерности ЛМК  $d$ . Чем ближе значение  $\pi(t)$  к единице, тем менее значительно преимущество предлагаемого подхода перед самоконтролем. При  $\pi(t) = 0.9$  и  $d > 2$  имеем  $P(t)/\pi(t) \approx 1.11$ , таким образом, комбинированный мультиплексный контроль обеспечивает повышение вероятности обнаружения отказа

примерно на 11%. Наибольший эффект от применения предлагаемого метода достигается при  $\pi(t) \approx 0.6 \div 0.7$ , что соответствует средней надежности блоков контроля (см. рис.8).



**Рисунок 8.** Графики зависимости отношения  $P(t)/\pi(t)$  от вероятности  $\pi(t)$  при фиксированной размерности мультиконтроллера  $d$

Снижение вероятности  $\pi(t)$  приводит к росту отношения  $P(t)/\pi(t)$ , причем, чем выше размерность ЛМК, тем более резок этот рост. К примеру, для  $\pi(t) = 0.8$  при  $d > 2$  имеем  $P(t)/\pi(t) > 1.24$ , таким образом, предлагаемый подход обеспечивает повышение вероятности обнаружения отказа более чем на 24%. При  $\pi(t) = 0.7$  и  $d > 3$   $P(t)/\pi(t) > 1.4$ , т.е. вероятность обнаружения отказа возрастает более чем на 40%. При  $\pi(t) = 0.6$  и  $d > 5$  имеем  $P(t)/\pi(t) > 1.51$ , таким образом, вероятность обнаружения отказа возрастает более чем на 51%.

При дальнейшем уменьшении вероятности  $\pi(t)$  преимущество предлагаемого подхода постепенно снижается. В асимптотике при  $d \rightarrow \infty$  и  $\pi(t) \rightarrow 0.5$  получаем  $P(t)/\pi(t) = 1$  (комбинированный мультиплексный контроль не имеет преимуществ перед

простым самоконтролем). Для двумерного ЛМК при  $\pi(t) \in [0.6; 0.9]$  отношение  $P(t)/\pi(t)$  лежит в пределах от 1.11 до 1.25. Таким образом, в большинстве практически значимых случаев предлагаемый подход позволяет повысить вероятность обнаружения локального отказа по сравнению с самоконтролем на  $11 \div 25\%$ . Наибольшее преимущество теоретически достигается при  $\pi(t) = 0.7$  и составляет примерно 25%. Межмодульный взаимоконтроль [17] при тех же условиях повышает указанную вероятность на  $8 \div 12\%$ , т.е. в  $1,375 \div 2,083$  раза менее эффективен. Простое увеличение числа контролируемых соседей при использовании взаимоконтроля при этом не оправдано, т.к. оно пропорционально увеличивает структурную избыточность ЛМК.

### Заключение

Предложенный подход к организации встроенного аппаратного контроля обеспечивают возможность оперативного выявления отказавших модулей в матричных ЛМК произвольной размерности. Результаты проведенных авторами исследований показывают, что он является хорошей альтернативой межмодульному взаимоконтролю в двух- и трехмерных системах, поскольку обеспечивает наиболее существенный рост вероятности обнаружения локальных отказов на всем диапазоне характерных для практики значений  $\pi(t)$ . Использование данных о расположении отказов в матрице позволяет реализовать динамическую реконфигурацию мультиконтроллера с последующим восстановлением его работоспособности без существенных затрат времени на выполнение контролирующих и ремонтных процедур. В ходе дальнейших исследований предполагается уточнить алгоритмы контроля соседних модулей, реализуемые блоками контроля, определить структурно-функциональную организацию блоков контроля, а также разработать метод задания множества контрольных точек в параллельных алгоритмах логического управления, позволяющий минимизировать вклад контролирующих процедур в общее время выполнения управляющего алгоритма.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов С.Г., Зотов И.В., Титов В.С. Архитектура параллельных логических мультиконтроллеров. М.: Высшая школа, 2009. 233 с.
2. Takanami I. Built-in self-reconfiguring systems for fault tolerant mesh-connected processor arrays by direct spare replacement // Proc. IEEE Intl Symp. Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 24-26 Oct. 2001. IEEE, 2001. P. 134-142.
3. Лаходынова Н.В., Воробьев В.А., Еремина Н.Л. Отказоустойчивость однородных процессорных матриц. Томск: Изд-во Томского архит.-строит. ун-та, 2002. 153 с.
4. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: пер. с англ. Ю.Г. Дадаева [и др.]; под ред. Ю.Г. Дадаева. М.: Мир, 1991. 672 с.
5. Борзов Д.Б. Размещение параллельных подпрограмм в мультимикроконтроллерах с учетом отказов // Изв. Вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52. №2. С. 55-59.

6. Типикин А.П., Борзов Д.Б. Проблема создания быстродействующего устройства планирования размещения параллельных процедур логического управления в мультиконтроллерах // Известия Юго-Западного государственного университета. 2011. №6-2 (39). С. 28-32.
7. Малышев А.В. Отказоустойчивая маршрутизация в реконфигурируемых матричных средах. Принципы и практические реализации. Saarbrucken, 2014. 118 с.
8. Павлюченко Д.В., Колосков В.А. Клеточный подход к отказоустойчивой маршрутизации в многопроцессорных структурах // Наука и бизнес: пути развития. 2014. №2 (32). С. 52-56.
9. Abdel-Jalil, J.N. A fault-tolerant message routing procedure with rotating coordinates / J.N. Abdel-Jalil, M.H. Najajra, E.I. Vatutin [et al.] // Proc. 3 Int. Conf. Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems (Spain, Mallorca, June 02-09 2005). Mallorca, 2005. P. 88-92.
10. Дианов В.Н. Диагностика и надежность автоматических систем. М.: МГИУ, 2005. 160 с.
11. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб. и др.: Питер, 2005. 478 с.
12. Rajski, J. Tyszer, M. Kassab, and N. Mukherjee. Embedded Deterministic Test // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2004. Vol.23, no. 5, pp. 776-792.
13. Sun-Yuan Hsieh, Chi-Ya Kao. The Conditional Diagnosability of k-Ary n-Cubes under the Comparison Diagnosis Model // IEEE Transactions on Computers. 2013. Vol.62, no. 4, pp. 839-843.
14. Бредихин Р.В., Нян Лин, Зотов И.В. Об организации встроенного аппаратного взаимоконтроля в логических мультиконтроллерах // Изв. Вузов. Приборостроение. 2013. Т.56, №6. С. 44-49.
15. Зотов И.В., Бредихин Р.В., Лисицин Л.А., Нян Лин. Принципы организации встроенного аппаратного межмодульного взаимоконтроля в матричных логических мультиконтроллерах // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2013. №1. С. 202-208.
16. Jamil Samih Al-Azzeh, Michael E. Leonov, Dmitriy E. Skopin, Evgeny A. Titenko, Igor V. Zotov. The Organization of Built-in Hardware-Level Mutual Self-Test in Mesh-Connected VLSI Multiprocessors // International Journal on Information Technology. 2015. Vol.3, no. 2. pp. 29-33.
17. Нян Лин. Параллельный алгоритм и аппаратные средства межмодульного взаимоконтроля логических мультиконтроллеров // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия «Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение». 2015. №3 (16). С. 62-67.

**Zotov Igor Valerievich**

FGBOU VO «South-West state university», Russia, Kursk  
E-mail: zotovigor@yandex.ru

**Mojo Min Vin**

FGBOU VO «South-West state university», Russia, Kursk  
E-mail: htunnyunt@mail.ru

**Tein Tun Njunt**

FGBOU VO «South-West state university», Russia, Kursk  
E-mail: htunnyunt@mail.ru

## On the organization of online inter-unit test in fault-tolerant logical multicontrollers

**Abstract.** The problem of online embedded hardware-level fault detection in mesh-connected multicontrollers is considered. A new approach to the multicontroller test based on the combination of self-test and mutual inter-unit test performed in multiplex mode is presented, which allows increasing the successful fault detection probability. Formal rules are defined for forming sets of testing and tested neighbors for each unit which are invariant to the location of the unit within the topological structure of the multicontroller and its dimension. It is shown that in contrast to the mutual inter-unit test mechanism, the same set of testing neighbors is alternately used to test the two units in multiplexed mode, and the test result is formed by applying the majority operator to the individual faulty/healthy tags calculated by all testing neighbors and the current unit itself in the course of its self-test. The formulae to determine the number of testing neighbors for each unit depending on the dimension of the multicontroller are given. The successful fault detection probability is evaluated in the case when the proposed approach is used; the successful fault detection probability vs. multicontroller dimension and the successful fault detection probability vs. the individual test unit reliability dependencies are investigated. The proposed approach is shown to provide increased successful fault detection probability compared to the mutual inter-unit test and self-test for all practically significant cases.

**Keywords:** logic control system; logical multicontroller; mesh-connected structure; parallelism; reliability; fault tolerance; local fault; embedded test; hardware-level test; majority operator

### REFERENCES

1. Emel'yanov S.G., Zotov I.V., Titov V.S. Arkhitektura parallel'nykh logicheskikh mul'tikontrollerov. M.: Vysshaya shkola, 2009. 233 s.
2. Takanami I. Built-in self-reconfiguring systems for fault tolerant mesh-connected processor arrays by direct spare replacement // Proc. IEEE Intl Symp. Defect and Fault Tolerance in VLSI Systems, 24-26 Oct. 2001. IEEE, 2001. P. 134-142.
3. Lakhodynova N.V., Vorob'ev V.A., Eremina N.L. Otkazoustoychivost' odnorodnykh protsessornykh matrits. Tomsk: Izd-vo Tomskogo arkhitekt.-stroit. un-ta, 2002. 153 s.
4. Kun S. Matrichnye protsessory na SBIS: per. s angl. Yu.G. Dadaeva [i dr.]; pod red. Yu.G. Dadaeva. M.: Mir, 1991. 672 s.
5. Borzov D.B. Razmeshchenie parallel'nykh podprogramm v mul'timikrokontrollerakh s uchetom otkazov // Izv. Vuzov. Priborostroenie. 2009. T. 52. №2. S. 55-59.

6. Tipikin A.P., Borzov D.B. Problema sozdaniya bystrodeystvuyushchego ustroystva planirovaniya razmeshcheniya parallel'nykh protsedur logicheskogo upravleniya v mul'tikontrollerakh // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2011. №6-2 (39). S. 28-32.
7. Malyshev A.V. Otkazoustoychivaya marshrutizatsiya v rekonfiguriruemykh matrichnykh sredakh. Printsipy i prakticheskie realizatsii. Saarbrucken, 2014. 118 s.
8. Pavlyuchenko D.V., Koloskov V.A. Kletochnyy podkhod k otkazoustoychivoy marshrutizatsii v mnogoprotsessornykh strukturakh // Nauka i biznes: puti razvitiya. 2014. №2 (32). S. 52-56.
9. Abdel-Jalil, J.N. A fault-tolerant message routing procedure with rotating coordinates / J.N. Abdel-Jalil, M.H. Najajra, E.I. Vatutin [et al.] // Proc. 3 Int. Conf. Information and Telecommunication Technologies in Intelligent Systems (Spain, Mallorca, June 02-09 2005). Mallorca, 2005. P. 88-92.
10. Dianov V.N. Diagnostika i nadezhnost' avtomaticheskikh sistem. M.: MGIU, 2005. 160 s.
11. Cherkesov G.N. Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov. SPb. i dr.: Piter, 2005. 478 s.
12. Rajski, J. Tyszer, M. Kassab, and N. Mukherjee. Embedded Deterministic Test // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. 2004. Vol.23, no. 5, pp. 776-792.
13. Sun-Yuan Hsieh, Chi-Ya Kao. The Conditional Diagnosability of k-Ary n-Cubes under the Comparison Diagnosis Model // IEEE Transactions on Computers. 2013. Vol.62, no. 4, pp. 839-843.
14. Bredikhin R.V., Nyan Lin, Zotov I.V. Ob organizatsii vstroennogo apparatnogo vzaimokontrolya v logicheskikh mul'tikontrollerakh // Izv. Vuzov. Priborostroenie. 2013. T.56, №6. S. 44-49.
15. Zotov I.V., Bredikhin R.V., Lisitsin L.A., Nyan Lin. Printsipy organizatsii vstroennogo apparatnogo mezhmodul'nogo vzaimokontrolya v matrichnykh logicheskikh mul'tikontrollerakh // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie». 2013. №1. S. 202-208.
16. Jamil Samih Al-Azzeh, Michael E. Leonov, Dmitriy E. Skopin, Evgeny A. Titenko, Igor V. Zotov. The Organization of Built-in Hardware-Level Mutual Self-Test in Mesh-Connected VLSI Multiprocessors // International Journal on Information Technology. 2015. Vol.3, no. 2. pp. 29-33.
17. Nyan Lin. Parallel'nyy algoritm i apparatnye sredstva mezhmodul'nogo vzaimokontrolya logicheskikh mul'tikontrollerov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie». 2015. №3 (16). S. 62-67.