

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ САМОКОНТРОЛИРУЕМЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад

Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, Иркутск, Россия

УДК 681.327; 658.588.2

Проведен системный анализ основных публикаций о динамическом контроле микропрограммных автоматов (МПА). Выполнен сравнительный анализ МПА Мура и оригинального автомата с выделяемыми логическими условиями. Предложены новые эффективные методы контроля, реализуемые в МПА с новой структурной организацией.

Ключевые слова: автоматы управления, алгоритм, комбинационная схема, структурный анализ, синтез, контроль автоматов.

System analysis main publication is brought in article on dynamic checking micro-programmed automatons (MPA). It is given analysis MPA of Moore and original automaton of the authors with selected logical condition. They are offered new efficient meth of the checking, realized in MPA with new structured organization.

Key words: automatons of management, algorithm, combinational scheme, structured analysis, syntheses, checking automaton.

Информационно-управляющие системы (ИУС) реального времени составляют основу средств автоматизации для мехатроники, летательных аппаратов, навигационных комплексов, технологических процессов и др.

Наиболее распространенной структурной моделью ИУС является модель В. М. Глушкова в виде операционного устройства и управляющего автомата, осуществляющего выдачу комплекса микроопераций для управления операциями преобразования и обработки информации. Согласно модели В. М. Глушкова ИУС содержат только два равноправных блока: операционное устройство (ОУ) и управляющий автомат (УА) [1].

Более детальной является модель ИУС Ю. Ф. Мухопада в виде пяти взаимосвязанных блоков: функционального, информационного, адресного, логического и управляющего [2, 3]. Для простейших ИУС УА реализуется в виде микропрограммного автомата, для более сложных ИУС каждый из блоков модели рассматривается как соответствующая подсистема с собственным УА. При этом УА становится иерархическим: верхний уровень — программный, а нижний уровень — микропрограммный автомат (МПА). В ряде случаев верхний уровень УА реализуется как МПА со структурой Мура. В зависимости от типа ИУС нижний уровень УА может быть комплексом МПА Мура или Мили.

Актуальность проблемы. Из результатов анализа следует определяющая роль УА в обеспечении правильности функционирования ИУС. Кроме того, идеология автоматного управления исключительно важна в следующих приложениях:

— конечные автоматы являются основой управления в любых ИУС от бытовых приборов до автомобилей и сложных технических систем;

- развивается направление создания спецпроцессоров с таблично-алгоритмическим набором функциональных преобразователей и МПА [2–4];
- УА составляют основу построения сверхбыстродействующих аппаратных средств криптографической защиты информации [5, 6];
- развиваются ИУС с элементами искусственного интеллекта с УА в виде комплексного МПА и таблично-алгоритмические структуры с МПА для задач классификации и распознавания образов с использованием когерентных локаторов;
- автоматный подход внедряется в программирование как в UML-технологии, так и непосредственно для составления программ [7–10].

Как правило, ИУС предназначены для управления ответственными процессами, в которых недопустима выдача неправильных команд, создающих опасную ситуацию. Для таких ИУС используются УА со встроенными средствами контроля, способными выдать сигнал о неисправности УА в процессе работы до выдачи очередной команды управления. Такие УА называются самоконтролируемыми. Проектирование схем самоконтроля УА связано с проблемой проектирования надежных МПА, отличающихся минимальными затратами логических элементов. Поэтому необходимо рассматривать структурную организацию МПА и методы минимизации для определения встроенных средств самоконтроля.

Теория анализа и синтеза МПА создавалась в основном в 1960–1999 гг. В последующее десятилетие в основном происходила адаптация типовых структур МПА к элементной базе БИС и СБИС [8, 11]. Это позволило авторам работы [7] сделать вывод о том, что теория аппаратной реализации МПА полностью завершена и новые постановки следует ожидать лишь в вопросах программной реализации моделей МПА. В настоящее время очевидна ошибочность такого вывода, поскольку в ведущих научных школах России и за рубежом появились новые разработки в области анализа и синтеза МПА на БИС, а также продолжаются теоретические работы в области конечных автоматов.

Структурная организация автоматов управления. Необходимо провести анализ структурной организации МПА для определения наиболее уязвимых блоков с целью разработки встроенных средств контроля. На рис. 1 приведена типовая структура МПА с правилом функционирования автоматов Мура (ОУ — операционное устройство (объект управления), выполняющее для МПА роль логической подсистемы, так как в ее состав включены датчики и схемы формирования двоичных сигналов; $\{\alpha\}$ — входные сигналы МПА; И — регистры памяти, составляющие основу информационного блока МПА; А — комбинационная схема F_1 для определения кода $Y = y_m \cdots y_2 y_1$ состояния автомата $a(t+1)$ по коду $X = x_m \cdots x_2 x_1$ состояния $a(t)$ и логическим условиям $\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_q$; F_1 — адресный блок МПА (наиболее простым методом реализации F_1 является считывание кода Y по конкатенации $\alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_q x_m \cdots x_2 x_1$, которая рассматривается как адрес ПЗУ); Ф — комбинационная схема F_2 для формирования управляющих команд $A_1 A_2 \cdots A_k$ по коду состояния $a(t)$; F_2 — функциональный блок; У — блок синхронизации (БС), формирующий по сигналу “Пуск” с периодом T импульсы синхронизации τ_1 и τ_2 , причем $\tau_1(t) \wedge \tau_2(t) = \emptyset$; БС — управляющий блок МПА). Число состояний автомата N определяет m — разрядность кодов X и Y в соотношении $N \leq 2^m$. При реализации адресного блока на ПЗУ или ПЛМ условный объем памяти равен $V = m \cdot 2^{m+q}$.

При оценке сложности автоматов по сравнению с адресным блоком остальные блоки можно не учитывать. Действительно, логический блок Л не относится непосредственно к МПА, информационный блок И — это два m -разрядных регистра памяти с парафазной связью между ними, а управляющий блок У для МПА — одна типовая микросхема генератора

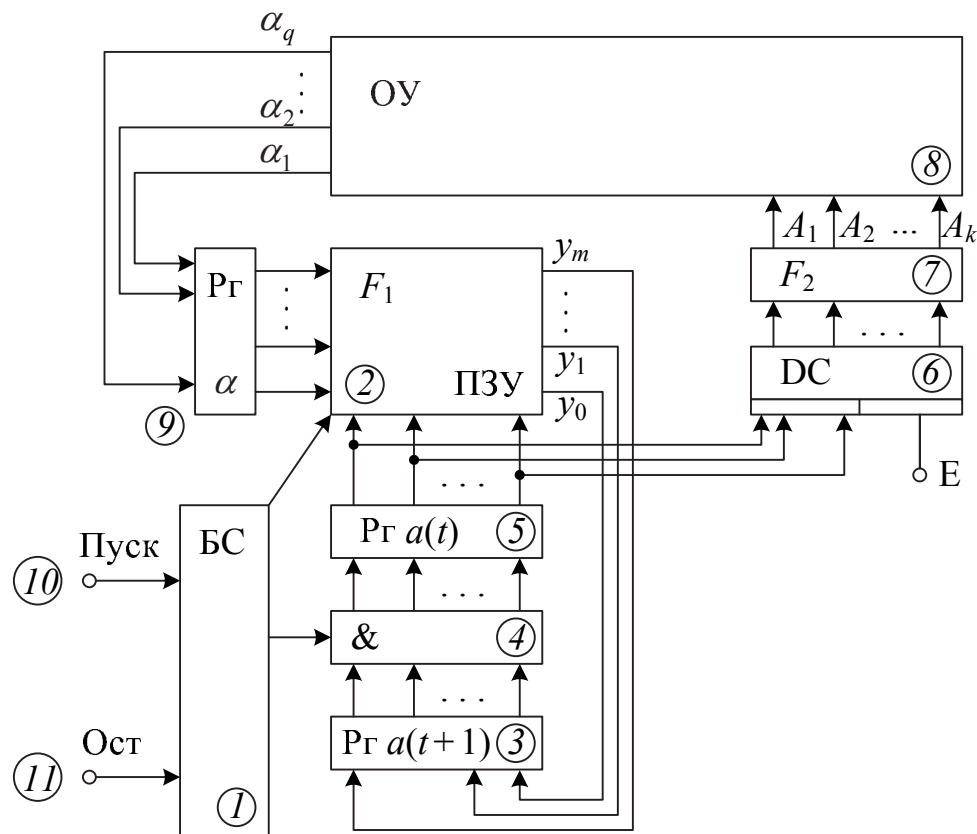


Рис. 1. Блок-схема автомата управления:
1–11 — номера блоков в порядке взаимодействия

Таблица 1

Основные параметры автоматов

Номер строки	Тип	m	q	$m + q$	$m+1$	V	W	Q
1	СП	3	4	7	4	0,384	0,048	8
2	ПА	4	8	12	5	16	0,128	128
3	СА	5	12	17	6	640	0,320	2048
4	ВС	6	16	22	7	24	0,768	32 748

импульсов и RS -триггер для подключения синхросигналов. Поэтому сложность МПА определяется значениями m , q для всех блоков (Φ , I , L , A) при фиксированной структуре БС классических МПА Мура.

По степени сложности адресного блока в соответствии с инженерной классификацией [9] МПА подразделяются на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней сложности (СА) и высокой сложности (ВС) автоматы. В табл. 1 приведена оценка объема ПЗУ в килобитах. Из табл. 1 следует, что значение V для СА-автоматов может быть приблизительно равно 1 Мбит, а для ВС составляет десятки мегабит.

При проектировании МПА прежде чем выбрать методы встроенного контроля, следует упростить А-подсистему. Существует два подхода:

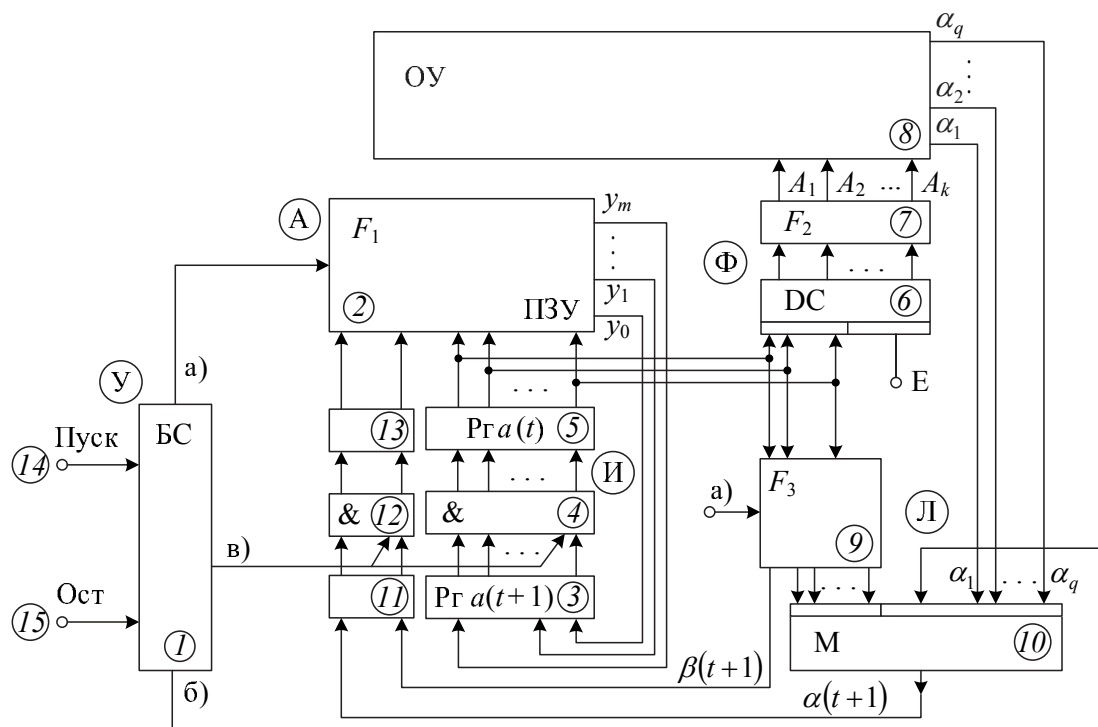


Рис. 2. Блок-схема автомата управления с выбором логического условия:
 1–15 — номера блоков в порядке взаимодействия; Ф — функциональная подсистема;
 И — информационная подсистема; Л — логическая подсистема;
 А — адресная подсистема; У — управляющая подсистема

— минимизация системы m булевых функций F_1 и реализация их на ПЛМ или ПЛИС с конкатенацией входных переменных $\{\alpha\}\{x\}$; число переменных равно $m + q$;

— представление системы F_1 параллельной последовательной структурой комбинационных схем (декомпозиция), в которой каждая из подсхем имеет число переменных на входе меньше $m + q$.

Первый подход эффективен для СП- и ПА-автоматов, но для СЛ- и ВС-автоматов снижение сложности А-блока не превышает 15% [11–14]. Второй подход [11, 13, 15] отличается высокой наукоемкостью, так как при проектировании необходимо в графе переходов найти несовместимые подграфы, решить задачу оптимальной раскраски графов и т. д. Однако эффект для СЛ- и ВС-автоматов также незначительный [15–18].

В работах [14, 19] предложен эффективный метод декомпозиции МПА, основанный на разделении не графов переходов, а исходной граф-схемы алгоритма (ГСА). Метод позволяет снизить объем ПЗУ (ПЛМ) в 1,5–1,7 раза для ВС- и СЛ-автоматов.

В работах [9, 20, 21] предложен кардинальный подход к снижению сложности А-блока, основанный на использовании оригинальной структуры МПА (рис. 2) с определением Y по коду X при использовании только одного логического условия $\alpha_j \in \{\alpha\}$. Номер j для α_j определяется по коду $a(t)$. Метод синтеза таких МПА Мура и Мили приведен в работах [2, 9, 14]. Объем ПЗУ такого А-блока определяется величиной $W = m \cdot 2^{m+1}$. Значение W не зависит от числа логических условий q . Выигрыш в объеме ПЗУ, обозначенный символом Q , и величины W для всех типов автоматов приведены в табл. 1. Для СЛ- и ВС-автоматов выигрыш составляет от единиц до десятков тысяч раз.

Вносимые в новую структуру МПА новые блоки в виде мультиплексора для выбора $\alpha_j \in \{\alpha\}$ и комбинационной схемы F_3 для определения j по коду $a(t)$ в сумме не превышают сложности новой комбинационной схемы F_1 с $m + 1$ переменной на входе.

В начальный период развития теории МПА различали автоматы Мура, Мили и В. М. Глушкова. Однако затем автоматы В. М. Глушкова не стали выделять как самостоятельные, так как они имеют обобщенную структурную организацию без конкретизации способов формирования выходных сигналов.

Структурная схема МПА с выделенным мультиплексором не только оригинальна, но и отлична от типовых структур Мура и Мили. Поэтому новая структурная организация МПА определяет также принципиально новый подход к синтезу высоконадежных МПА и организации для них встроенных средств самоконтроля.

Методы контроля и диагностики МПА. Достаточно полного обзора методов контроля МПА не проводилось, поэтому в данной работе рассмотрены основные из них. В 1970–1980-х гг. появились работы, посвященные контролю и диагностике ЭВМ, в которых частично ставилась задача контроля устройств управления, главным образом в режиме тестовой (предстартовой) проверки МПА [22–24]. Динамический контроль конечных автоматов развивался самостоятельно в двух не строго делимых направлениях:

- встраивание средств контроля в уже спроектированный МПА;
- проектирование МПА, обладающих свойством самоконтроля.

Одной из первых появилась работа А. Д. Закревского [22], в которой предложена минимизация систем булевых функций не только основных разрядов, но и дополнительных, образующих контрольные биты, соответствующие коду Хэмминга [23]. Метод обеспечивает высокий уровень контролеспособности при небольшом увеличении объема F_1 , однако не нашел применения вследствие необходимости встраивать в структуру МПА сложный декодер кода Хэмминга.

Корректирующие коды, используемые для контроля комбинационных схем МПА, подробно рассмотрены в ряде монографий [24–27], а эффективность метода для обеспечения надежности МПА оценена в работе [28].

Второй подход предложен М. А. Гавриловым [29] для синтеза d -безотказных автоматов, правильно выполняющих функции при числе отказов $t \leq d$. Для реализации метода необходимо:

- представить состояния МПА векторами (словами) минимально избыточного корректирующего кода;
- чтобы расстояние между отдельными векторами соответствовало кодовому расстоянию по Хеммингу не менее $2d + 1$.

Метод М. А. Гаврилова изложен в работе [24], однако он также не нашел применения вследствие необходимости введения значительной избыточности и без того сложных СА- и ВС-автоматов.

В большинстве методов динамического контроля используются специальные коды для представления $a(t)$ и $a(t + 1)$ вместо двоично-позиционного (ДПК) или двоичного соседнего кода (кода Грея). Поэтому далее следует рассмотреть различные типы кодирования для обеспечения самоконтроля МПА.

В работе [30] предложено использовать код с фиксированным числом “1”, обозначенный kCn , т. е. k единиц в n -разрядном коде. Этот метод имеет несколько модификаций, в частности разделение m -разрядного кода $a(t)$ на две части и представление каждой из них кодом kCn , например 2 из 5 или 3 из 7 [16]. В работе [17] изложены методы синтеза схем проверки

наличия двух единиц в пятиразрядном коде или трех единиц в семиразрядном коде и др. В работе [31] предложена модификация метода kCn , позволяющая обнаруживать отказы разрядных переходов из “0” в “1”.

Метод контроля kCn является наиболее простым и быстродействующим, но сами комбинационные схемы определения k единиц в n -разрядном результате достаточно сложны. Кроме того, объем ПЗУ равен не $V = m \cdot 2^{m+q}$, а $V = 2m \cdot 2^{2m+q}$.

Предлагается также при кодировании $a(t)$ в виде ДПК дописать инверсный код, соответствующий числу единиц в ДПК (коды Бергера). Этот метод требует выполнения операций подсчета числа “1” в ДПК и сравнения с инверсным кодом [17, 24].

Другим подходом к контролю является метод В. Н. Балакина и В. В. Барашенкова [32, 33], который требует введения в структуру МПА счетчиков для определения числа операторов перед проверкой логических условий, введения в граф переходов специальных контролируемых состояний и др. Метод эффективен, так как не только проверяет правильность переходов $a(t) \rightarrow a(t+1)$, но и обнаруживает неверную генерацию A_i вместо A_j . Такие средства контроля весьма сложны, но применимы для контроля параллельных процессов [34].

Результативным подходом является метод А. Н. Буинова [35], предложившего построить объединенную матричную модель сигналов, представленных множеством допустимых состояний (матрица A) и множеством запрещенных состояний для каждого допустимого состояния $a(t)$ (матрица B). Сравнение входных сигналов при достигнутом состоянии $a(t+1)$ с матрицами A и B позволяет принять решение о правильности функционирования МПА. Метод А. Н. Буинова требует очень больших аппаратных и временных затрат и не нашел применения для динамического контроля, однако может быть использован для тестового контроля МПА, который в данной работе не рассматривается.

При динамическом контроле применим также известный метод полного дублирования МПА. Вариантом более эффективного контроля является самодвойственное дублирование, обеспечивающее в среднем 67 % избыточности при 99 % покрытия неисправностей [36]. Однако этот метод требует дальнейшего исследования, так как одновременно требуется двойная временная избыточность.

Новые методы самоконтроля. В работе [37] с целью уменьшения числа активных элементов в числовом блоке ПЗУ предложено использовать представление хранимого кода с фиксированным числом единиц как результат независимой дешифрации частей m -разрядного кода ДПК. Код назван геометрическим, так как работа [37] опубликована до появления кодов kCn . Более подробно метод изложен в работе [3]. В работе [38] идея этого метода использована для контроля ПЗУ. Для контроля МПА использован модифицированный геометрический код (МГК), определенный в виде конкатенации трехразрядных групп с одной единицей в каждой, причем в общем коде (МГК) с разрядностью $n = 2m$ (m — разрядность ДПК) недопустимо соседство двух единиц в соседних разрядах между группами. Оригинальность метода [39] контроля МПА с МГК определяется тем, что код МГК используется только для представления $a(t+1)$. Код $a(t+1)$ по цепи обратной связи преобразуется в модифицированный двоичный код (МДК) по правилу $001 \rightarrow 00, 010 \rightarrow 01, 100 \rightarrow 10$. Тогда на входе F_1 в коде $a(t)$ в каждой группе из двух разрядов не должно быть комбинации “11”, а на выходе F_1 в каждой группе из трех разрядов допустима единственная комбинация с одной “1”.

По уровню контролеспособности предложенный метод эквивалентен методу kCn , однако схемы определения наличия одной “1” в каждой группе из трех разрядов тривиальны в реализации, в отличие от схем определения k произвольно расположенных “1” в n -разрядном

коде. Для МГК ошибка (ERR) в каждой группе из трех разрядов, обозначенных побитно a, b, c , определяется выражением

$$ERR = \overline{(a\bar{b}\bar{c} + \bar{a}b\bar{c} + \bar{a}\bar{b}c)}.$$

Предложенный оригинальный метод самоконтроля [39] наиболее эффективен для новой структуры МПА, так как при использовании ПЗУ объем памяти $W = m \cdot 2^{m+1}$ станет равным $W = (2m + 1) \cdot 2^{m+2}$ ($m + 1$ — разрядность МДК; $2m$ — разрядность МГК). Для типового МПА Мура при использовании МГК и МДК объем памяти равен $W = 2m \cdot 2^{2m+q}$.

Для новой организации МПА становятся эффективными также другие методы контроля, в частности метод мажоритарного дублирования схемы F_1 . Применительно к МПА этот метод модифицирован следующим образом. Используются три комбинационные схемы F_1 , однако две из них осуществляют прямое преобразование $a(t + 1) = F_1(\alpha_j a(t))$, а третья схема реализует обратное преобразование $a(t) = F_1^0(\alpha_j a(t + 1))$, причем в дублированных F_1 используется МГК, а в F_1^0 применяется МДК для представления $a(t + 1)$. Алгоритм проверки включает следующие действия:

1. Проверка отсутствия ошибок в МГК для всех дублированных F_1 , обозначенных F_1^1 и F_1^2 . Если в каждой схеме ошибки отсутствуют, то при равенстве выходов F_1^1 и F_1^2 код $a(t + 1)$ считается верным.

2. При наличии ошибки в одной из дублированных схем выполняются преобразование $a(t) = F_1^0(\alpha_j a(t + 1))$ и сравнение полученного кода $a(t)_0$ с исходным кодом $a(t)$. При равенстве кодов результат считывается с исправной схемы F_1 . Иначе фиксируется ошибка.

Предложенный метод контроля обеспечивает безопасный режим работы МПА при любой кратности ошибок в А-подсистеме. Очевидно, что такой метод контроля невозможен в МПА с классической структурой Мура, так как в таких автоматах невозможно построить F_1^1, F_1^2, F_1^0 .

В новой структуре МПА применим еще один вариант дублирования комбинационной схемы F_1 . Структура МПА определяется следующими модификациями:

- в графе переходов МПА выделяется наиболее длинный путь, удовлетворяющий условию $a(t + 1) = 1 + \alpha a(t)$ (α — признак безразличного выбора значения α);
- для этих переходов предусматривается счетчик с кодом Грея, который одновременно выполняет роль выходного регистра памяти $a(t + 1)$ в И-системе МПА;
- остальные переходы реализуются схемой F_1 ;
- параллельно устанавливается дублирующая схема для вычисления кода $a(t + 1)$. В этой схеме F_1^1 используется принцип независимого вычисления первой Y_1 и второй Y_2 половин Y кода $a(t + 1)$ по первой X_1 и второй X_2 частям X кода $a(t)$ с учетом α_j для первой и второй частей.

Поскольку при X_1 и X_2 используются только части X единого кода $x_1 x_2 \dots x_m$, при вычислении Y_1 и Y_2 возможно появление неопределенности. Для ее ликвидации используется еще одна двоичная переменная γ , значение которой определяется в основной схеме F_1 совместно с кодом $Y = y_1 y_2 \dots y_m$.

В предложенной схеме вычисления Y дублированная схема определения кода $a(t + 1)$ требует меньших затрат, чем при полном дублировании F_1 .

Синтез встроенных средств контроля рассмотрим на примере МПА с $m = 4, q = 6$, алгоритм работы которого представлен в виде логической схемы алгоритма (ЛСА)

$$A_0 \downarrow A_1 \bar{\alpha}_1 \uparrow A_2 \bar{\alpha}_2 \uparrow A_3 A_4 \downarrow \downarrow A_5 A_6 \bar{\alpha}_3 \uparrow A_7 A_8 \bar{\alpha}_4 \uparrow \downarrow A_9 A_{10} A_{11} \alpha_5 \uparrow A_{12} A_{13} A_{14} \bar{\alpha}_6 \uparrow \downarrow A_{15} A_k.$$

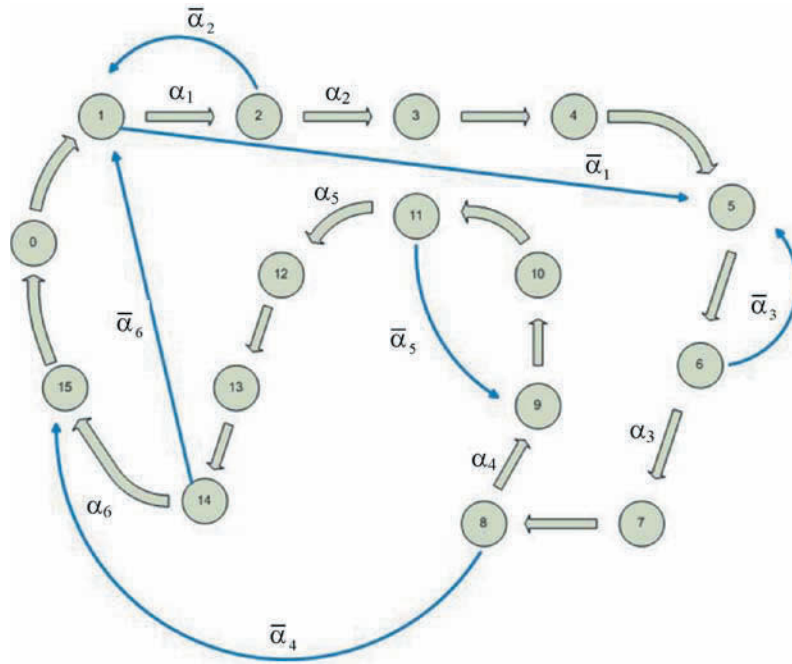


Рис. 3. Граф переходов МПА:

0–15 — узлы графа, соответствующие состояниям МПА; $\alpha_1, \dots, \alpha_6, \bar{\alpha}_1, \dots, \bar{\alpha}_6$ — условные связи

В работе [2] приведены правила перехода от ГСА к ЛСА. Представленная ЛСА получена после модификации ГСА за счет введения пустого оператора A_2 . Граф переходов МПА для ЛСА представлен на рис. 3 (двойными стрелками отмечен непрерывный путь через состояния 0, 1, 2, ..., 15, 0). Такому пути может быть поставлен в соответствие счетчик, работающий в коде Грея (табл. 2). В этом случае схема F_1 реализует только шесть переходов по табл. 3. Заметим, что все переходы в F_1 реализуются по условию $\bar{\alpha}_j$, так как по условию α_j для данного примера переходы осуществляются по счетчику. Для построения контролирующей схемы по табл. 3 строится табл. 4, в которой в первом столбце введена логическая переменная γ для снятия неопределенности при некоторых кодах: $x_1x_2(00 \rightarrow 01, 00)$ и $x_3x_4(01 \rightarrow 01, 11)$. Булевы функции y_1, y_2, y_3, y_4 определяются по картам Карно на основе табл. 4. Реализация этих функций тривиальна, так как для примера определяется уравнениями

$$\begin{aligned}
 y_1 &= (x_1\bar{x}_2 + \gamma x_2)\bar{\alpha}, \\
 y_2 &= (\bar{\gamma}x_1\bar{x}_2)\bar{\alpha}, \\
 y_3 &= \bar{\gamma}(x_4 + x_3)\bar{\alpha}, \\
 y_4 &= \bar{\gamma}x_3x_4\bar{\alpha}.
 \end{aligned}$$

При реализации МПА Мура по традиционной схеме с дублированием F_1 при $m = 4, q = 6$ общий объем двух схем составит более 8 кб, так как для каждой схемы $W = m \cdot 2^{m+q}$. В новом автомате необходимы одна схема с объемом $W = m \cdot 2^{m+1} = 0,127$ кб и тривиальная дублирующая схема для реализации уравнений Y . При больших значениях m, q преимущество предлагаемого метода самоконтроля и новой структуры МПА будут еще более значимыми.

Таблица 2

Четырехразрядный код Грея			
Номер	0000	8	1100
1	0001	9	1101
2	0011	10	1111
3	0010	11	1110
4	0110	12	1010
5	0111	13	1011
6	0101	14	1001
7	0100	15	1000

Таблица 3

Функции переходов МПА		
$a(t)$	α	$a(t+1)$
1	$\overline{\alpha 1}$	5
2	$\overline{\alpha 2}$	1
6	$\overline{\alpha 2}$	5
8	$\overline{\alpha 4}$	15
11	$\overline{\alpha 5}$	9
14	$\overline{\alpha 6}$	1

Таблица 4

Кодирование функций переходов МПА

γ	$N(t)$	α	$N(t+1)$
0	0001	0	0111
1	0011	0	0001
0	0101	0	0111
0	1100	0	1000
0	1110	0	1101
1	1001	0	0001
γ	$X_4 x_3 x_2 x_1$	α	$Y_4 y_3 y_2 y_1$

Предложенные методы синтеза безопасных МПА применимы в ИУС, не использующих параллельные процессы вычисления и управления. Параллелизм проявляется лишь в наборе микроопераций $C_1 C_2 \dots C_k$ в командах $A_i \in \{A\}$. При параллельных вычислениях и одновременной выдаче нескольких команд управления перспективен подход с применением сетей Петри. В работе [40], по-видимому, впервые для контроля ИУС применены сети Петри с запрещающими дугами. Позднее такие модели были названы joiner-сети [41, 42].

В работах [14, 40] показано, что сеть Петри с запрещающими дугами реализуется двумя взаимодействующими автоматами, для которых входы одного автомата являются выходами другого.

При системном анализе методов и средств динамического контроля МПА рассмотрены лишь основные принципиально различающиеся постановки. Полный детальный анализ работ, посвященных построению безопасных автоматов, будет упрощен за счет использования результатов анализа, выполненного в данной работе.

Следует отметить особую роль исследований научной школы В. В. Сапожникова и Вл. В. Сапожникова. Результаты их многолетней деятельности приведены в фундаментальной публикации [43].

Следует отметить также высокую значимость новой структурной организации МПА для повышения контролеспособности и надежности.

В представленной работе в основном рассматривались автоматы Мура. Метод построения МПА Мили с новой структурной организацией предложен в работе [44].

Исследования новой структурной организации МПА только начаты, поэтому имеется резерв как для модификации, так и для создания новых методов самоконтроля МПА.

Заключение. Предложенная в данной работе структурная организация микропрограммных автоматов предоставляет возможность построения высоконадежных систем управления с оригинальными средствами самоконтроля, обеспечивающими режимы безопасной работы сложных технических систем реального времени при минимальных затратах специально встраиваемого оборудования.

Список литературы

1. Глушков В. М. Автоматно-алгебраические аспекты оптимизации микропрограммных автоматов // Тр. Междунар. конгр. математиков. М.: АН СССР, 1968. С. 53–55.
2. Мухопад Ю. Ф. Теория дискретных устройств. Иркутск: ИрГУПС, 2010.
3. Мухопад Ю. Ф. Проектирование специализированных микропроцессорных вычислителей. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1981.
4. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. Табличная обработка информации. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
5. ПАТ. РФ МКИ G 11 В 20/20, 20/12. Устройство криптографической защиты информации / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Б. Н. Антошкин. № 82889; 2009. Бюл. № 13.
6. RENJI TAO. Finite automata and application to cryptography. Beijing: Inst. of Software, 2007.
7. ПОЛИКАРПОВА Н. Автоматное программирование / Н. Поликарпова, А. А. Шалыто. СПб.: Питер, 2009.
8. СОЛОВЬЕВ В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС / В. В. Соловьев, А. Климович. М.: Горячая линия — Телеком, 2008.
9. МУХОПАД А. Ю. Структурный синтез автоматов управления системами обработки информации реального времени: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Братск: БрГУ, 2009.
10. ВОЕВОДА А. А., РОМАННИКОВ Д. О. Использование UML и временных сетей Петри при разработке программного обеспечения // Сб. науч. тр. НГТУ. 2010. № 3. С. 61–70.
11. ГОРБАТОВ В. А. Теория автоматов / В. А. Горбатов, А. В. Горбатов, М. В. Горбатова. М.: АСТ “Астрель”, 2008.
12. АЧАСОВА С. М. Алгоритмы синтеза автоматов на ПЛИС. М.: Сов. радио, 1987.
13. ЗАКРЕВСКИЙ А. Д. Анализ и синтез каскадных схем. М.: Наука, 1981.
14. МУХОПАД Ю. Ф. Микроэлектронные системы управления. Братск: БрГУ, 2009.
15. БАРАНОВ С. И., СИНЕВ В. Н., ЯНЦЕН Н. Я. Синтез автоматов на элементах с матричной структурой // Проектирование функционально-ориентированных вычислительных систем. Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. С. 90–108.
16. COOK G., ANDERSON D., METZE G. Design of totally self check circuits for m-out-of-n codes // IEEE Trans. 1973. V. 22, N 3. P. 255–263.
17. САПОЖНИКОВ В. В. Теория дискретных устройств ж. д. автоматики, телемеханики и связи / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, Ю. М. Кравцов. М.: Транспорт, 2001.
18. РЫЦАР Б. Е., КМЕТЬ А. Б. Новый метод кодирования подфункций в задачах синтеза цифровых устройств на ПЛИС // Кибернетика и систем. анализ. 2003. № 2. С. 63–89.
19. БАДМАЕВА Т. С., ДЕКАНОВА Н. П., МУХОПАД Ю. Ф. Синтез самоконтролируемой системы управления электроавтоматикой // Математические и информационные технологии в энергетике, экономике, экологии. Иркутск: СЭИ СО РАН, 2003. Ч. 1. С. 88–92.
20. ПАТ. РФ МКИ G 06 F 9/00(2006.01). Микропрограммный автомат / А. Ю. Мухопад, Ю. Ф. Мухопад. № 82888; 2006. Бюл. № 13.

21. МУКНОРАД ҮР. F., МУКНОРАД А. ҮР. Microelectronic controlling of realtime complicated technical systems // Intern. J. Appl. Fund. Res. 2009. N 2. P. 26–29.
22. ЗАКРЕВСКИЙ А. Д. Метод синтеза функционально устойчивых автоматов // Докл. АН СССР. 1969. № 4. С. 381–386.
23. HAMMING R. W. Error detecting and error correcting codes // Bell System Tech. 1950. V. 29, N 2. P. 147–160.
24. СОГОМОНЯН Е. С. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы / Е. С. Согомонян, Е. В. Слабаков. М.: Радио и связь, 1989.
25. ФРАНЦИС Т. А. Избыточность в электронных дискретных устройствах / Т. А. Францис, Г. Ф. Янбых. Л.: Энергия, 1969.
26. ЩЕРБАКОВ Н. С. Структурная теория аппаратного контроля цифровых автоматов / Н. С. Щербаков, Б. П. Подкопаев. М.: Машиностроение, 1982.
27. ТОЦЕНКО В. Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. М.: Радио и связь, 1985.
28. ФРАНЦИС Т. А., БУЗИНАУСКЕНЕ Е. Н. Нижняя оценка выигрыша надежности при использовании кодов Хемминга в комбинационных автоматах // Вопросы надежности дискретных автоматов. Рига: Зинатне, 1970. С. 3–16.
29. ГАВРИЛОВ М. А. Структурная избыточность и надежность работы релейных устройств // Тр. 1-го Междунар. конгр. Междунар. федерации по автомат. управлению. М.: Изд-во АН СССР, 1967. Т. 3. С. 105–112.
30. ТОМА Ү., ОНАҮАМА J., САКАJ R. Realization on fail-safe sequential machines by using a k-out-of-N code // IEEE Trans. Comput. C-22, 1971. N 11. P. 22–27.
31. ВАЛИЕВ Ш. К. Способ построения и реализации асинхронных конечных автоматов // Совершенствование и повышение надежности железнодорожных систем автоматизации и связи. Днепропетровск: ДнИИЖТ, 1985. С. 88–95.
32. БАЛАКИН В. Н., БАРАШЕНКОВ В. В., УСАЧЕВ Ю. Е. Синтез устройства диагностирования по схемам алгоритмов управления // Автоматика и телемеханика. 1984. № 6. С. 138–144.
33. А. с. СССР МКИ G 11 C 11/00(2006.01). Устройство для контроля блоков управления / В. Н. Балакин, В. В. Барашенков, А. Ф. Казак, С. А. Никищенков. № 1365986; 1988. Бюл. № 1.
34. НИКИЩЕНКОВ С. А. Функциональная диагностика реконфигурируемых транспортных технологических систем по информационно-логическим схемам процессов. Самара: СНЦ РАН: СамГАПС, 2005.
35. БУИНОВ А. Н. Построение управляющих автоматов с безошибочным поведением // Проектирование специализированных вычислителей и управляющих устройств. Иркутск: ИГУ, 1984. С. 3–9.
36. САПОЖНИКОВ В. В. Самодвойственные дискретные устройства / В. В. Сапожников, Вл. В. Сапожников, М. Гессель. СПб.: Энергоатомиздат. С.-Петербург. отд-ние, 2001.
37. СМОЛОВ В. Б., ЧЕКМАРЕВ Ю. Д., МУХОПАД Ю. Ф. Использование системы геометрических кодов в ПЗУ // Изв. вузов. Сер. Приборостроение. 1971. Т. 14, № 6. С. 73–79.
38. А. с. СССР МКИ G 05 B 19/045. Постоянное запоминающее устройство с контролем / Ю. Ф. Мухопад, Ю. Д. Чекмарев. № 1410101. 1988. Бюл. № 26.
39. Пат. РФ МКИ D 11 C 11/00(2006.01). Самоконтролируемый автомат управления / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Т. С. Бадмаева. № 63588; 2007. Бюл. № 15.
40. МУХОПАД Ю. Ф., СЕРБУЛЕНКО Л. М. Автоматная интерпретация устройств контроля микропроцессорных систем // Микропроцессорные системы контроля и управления: Тр. Сиб. науч.-техн. конф., Новосибирск, 10–11 сент. 1992 г. Новосибирск: НЭТИ, 1992. С. 41–49.
41. НОВИК К. В. Сеть автоматов для моделирования асинхронного взаимодействия процессов: Автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. М.: Изд-во МГУ, 2005.

42. Вильнер П. Ю. Метод диагностирования отказов сложных технических систем с использованием сетей Петри // Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании: Тр. 10-й Байкал. Всерос. конф., Иркутск, 10–14 июля 2005 г. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2005. Ч. 1. С. 239–335.

43. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств СПб.: СПб ГУПС: Элмор, 2009.

44. МУХОПАД Ю. Ф., МУХОПАД А. Ю. Методы синтеза автоматов управления на больших интегральных схемах // Пробл. информатики. 2011. № 4. С. 17–28.

*Мухопад Юрий Федорович — д-р техн. наук, засл. деятель науки РФ,
засл. проф. Иркутского государственного университета путей сообщения;
тел.: (3952) 59-86-64; e-mail: bts48@mail.ru;*

*Мухопад Александр Юрьевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
Иркутского государственного университета путей сообщения;
тел.: 8-902-172-45-53; e-mail: jctmg@mail.ru*

Дата поступления — 10.10.12