

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ  
И ИДЕНТИФИКАЦИЯ

AUTOMATIC CONTROL  
AND IDENTIFICATION

УДК: 658.:5:681.3

## Контроль управляющих автоматов сложных технических систем реального времени\*

Ю.Ф. МУХОПАД<sup>1</sup>, А.Ю. МУХОПАД<sup>2</sup>, Д.Ц. ПУНСЫК-НАМЖИЛОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения, доктор технических наук, профессор. E-mail: [bts48@mail.ru](mailto:bts48@mail.ru)

<sup>2</sup> 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Иркутский государственный университет путей сообщения, доктор технических наук, и.о. доцента. E-mail: [jcmg@mail.ru](mailto:jcmg@mail.ru)

<sup>3</sup> 634034, РФ, г. Томск, ул. Советская, 99, ООО «ХИМТЕХ-ЮКОС», генеральный директор, кандидат технических наук, доцент. E-mail: [dablutf@mail.ru](mailto:dablutf@mail.ru)

Рассматриваются методы динамического контроля управляющих автоматов (УА). Для сложных технических систем реального времени управляющие автоматы могут составлять большую часть оборудования средств автоматизации. Управляющие автоматы со структурной организацией Мура даже после минимизации не обеспечивают достаточного уровня безотказности и безопасности. Динамический контроль УА со специальными кодами наиболее эффективен для УА с выделением одного логического условия из всего множества условий по коду предыдущего состояния. Предложен метод контроля с нетрадиционным применением кодов Грея при разделении кодов на два множества, относящихся к счетчику и множеству вершин вне счетчика. Во втором множестве коды состояний делятся приблизительно пополам на группы старших и младших разрядов. Номер последующей вершины выбирается так, чтобы логическая сумма по модулю кодов соседних вершин младших разрядов соответствовала условию Грея. Коды старшей группы этих вершин доопределяются специальным образом для выполнения того же условия. Выведены правила принятия решений. Для реализации контроля к базовому составу блоков УА вводится только схема логического сложения и проверки правил принятия решений. Метод позволяет создавать высоконадежные, самоконтролируемые управляющие автоматы с минимальными объемами встраиваемых средств контроля.

**Ключевые слова:** алгоритм, управление, автомат, контроль, диагностика, кодирование информации, технические системы, математическая модель, логическая сумма

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-53-62

## ВВЕДЕНИЕ

Бортовые системы летательных аппаратов, распределенных нефтегазовых комплексов и средств мехатроники относятся к числу сложных технических систем (СТС) реального времени, работающих в экстремальных услови-

---

\* Статья получена 30 сентября 2016 г.

ях. В ряде технологических процессов при отступлении от регламента могут возникать пожароопасные и взрывоопасные ситуации с катастрофическими последствиями. Поэтому необходимо обеспечить не только тестовый контроль, но и динамическую оценку состояния системы в процессе функционирования [1–3].

В спецпроцессорах СТС совместно с информационной подсистемой управляющая подсистема может составлять до  $2/3$  оборудования, поэтому контроль этих подсистем является первоочередной задачей. Безотказность управляющих автоматов должна быть на порядок выше СТС.

Управляющие автоматы разделяются на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней сложности (СА), сложные (АС), высоко сложные (ВС), особо сложные (ОС) и ультрасложные (УС) автоматы. Методы синтеза ориентированы на минимизацию комбинационных схем как основы структурной организации управляющих автоматов Мура [4–7]. Их динамический контроль осуществляется в основном за счет применения равновесного и других типов контролирующих кодов [8–11].

Кроме СП автоматов для всех других типов УА эффективна новая структурная организация, предложенная в работах [12–16] и основанная на введении мультиплексора для выбора одного логического условия  $\alpha_j \in \{\alpha\}$  по коду состояния  $a(t)$  на каждом периоде функционирования. Кроме мультиплексора в известную структуру УА Мура вводится также схема адресации  $F_3(9)$  с регистром памяти  $Rg(10)$  адреса ( $j$ ) в виде кода  $z_1, \dots, z_r$ . Информационная подсистема УА организуется с регистром памяти  $Rg(6)$  состояния  $a(t+1)$ , парафазно связанного через схемы «И»(7) со счетчиком  $Сч(8)$  состояния  $a(t)$ . Причем признак  $\gamma = (+1)$  к содержимому  $Сч(8)$  формируется также в  $F_1(4)$ .

Контроль нового УА целесообразно осуществлять по выходному коду  $y_1, \dots, y_m$  состояния  $a(t+1)$ , формируемого комбинационной схемой  $F_1(4)$  с регистром  $Rg(5)$  функциональной подсистемы, и коду  $x_1, \dots, x_m$  информационной подсистемы. Логическая подсистема в виде  $Rg(1)$ , мультиплексора  $M(2)$ ,  $RS$ -триггера (3) и адресная подсистема в виде схемы  $F_3(9)$  и  $Rg(10)$  значительно проще функциональной и информационной подсистем. Остальные блоки УА ( $Rg(5)$ , дешифратор  $DC(11)$  и схема формирования команд  $F_2(12)$ ) для сокращения связей относят к объекту управления ОУ(13). Блок синхронизации БС(14) формирует управляющие сигналы  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ .

Математическая модель нового автомата имеет вид

$$a(t+1) = F_1(\alpha_j x_1, x_2, \dots, x_m); \quad A(t+1) = F_2(y_1, \dots, y_m); \quad j = F_3(y_1, \dots, y_m).$$

Разрядность двоичного кода информационной подсистемы и выходной код  $y_1, \dots, y_m$  для каждого перехода из предыдущего  $a(t)$  в последующее  $a(t+1)$  состояние определяется по методике работы [13] через граф-схему алгоритма, функционально-тождественно преобразованную за счет ввода пустых операторов. На рис. 1 представлена преобразованная ГСА. Понятие «пустой» соответствует оператору без формирования управляющей команды.

По преобразованной ГСА определяются граф переходов (рис. 2) и таблица переходов (табл. 1) вне счетчика.

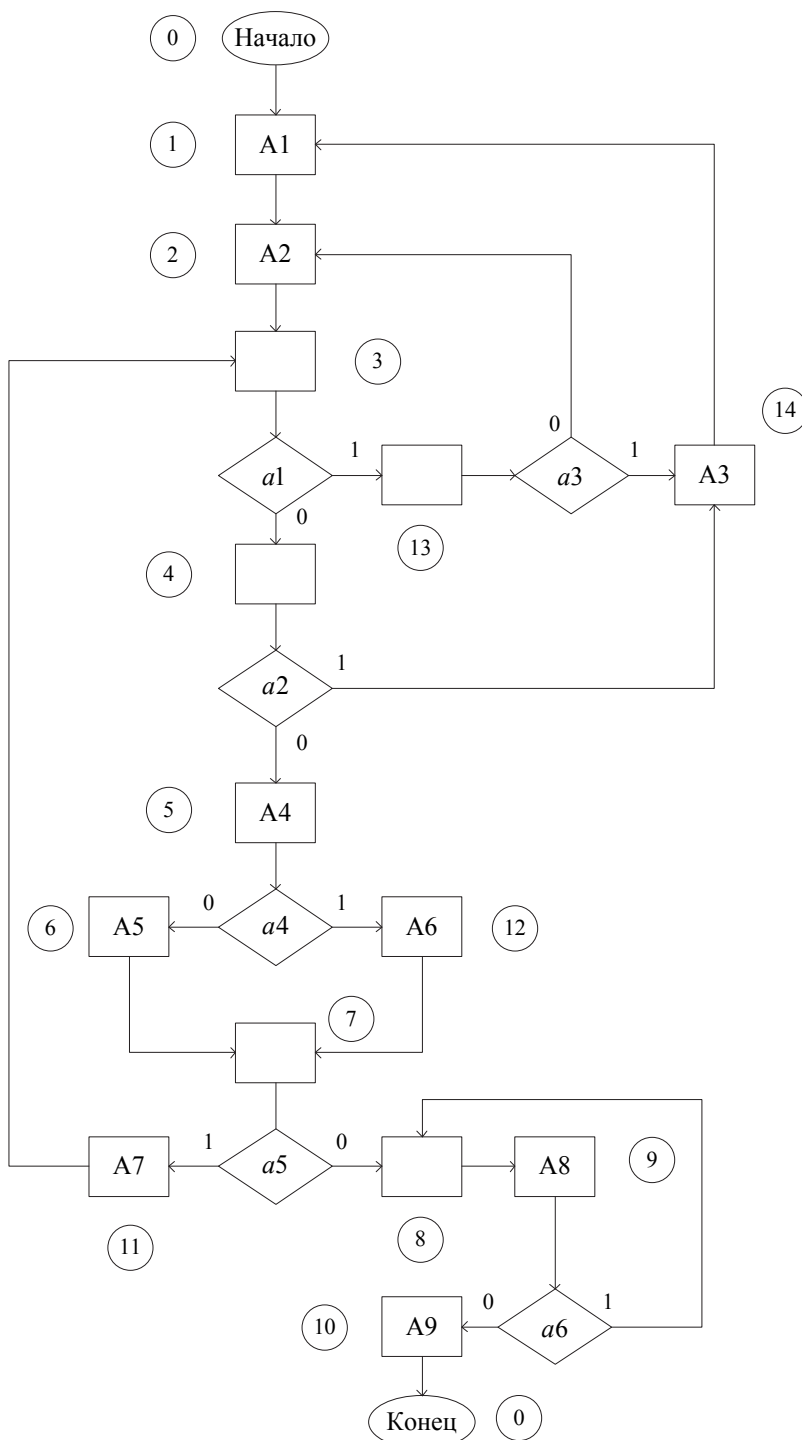


Рис. 1. Граф-схема алгоритма управления нового автомата

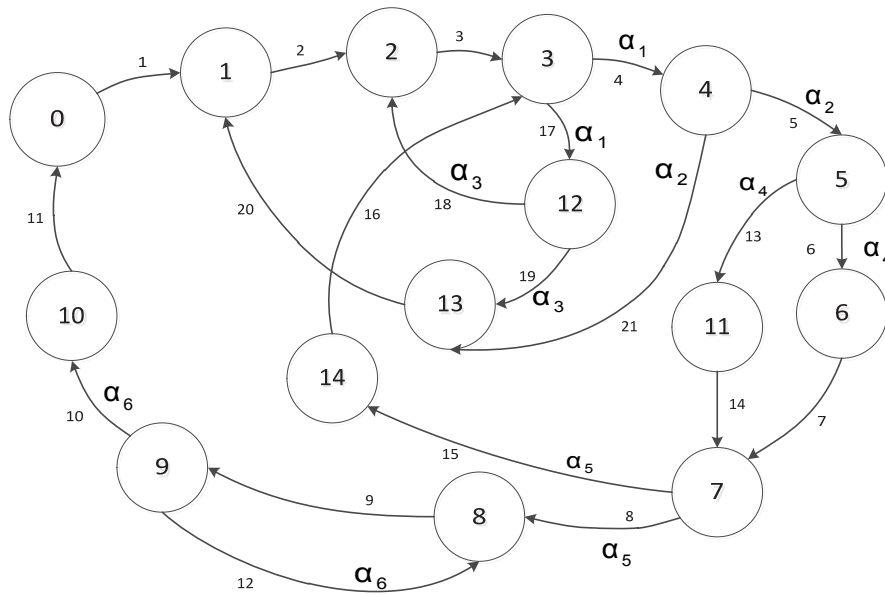


Рис. 2. Граф переходов

Условие прибавления единицы к содержимому счетчика ( $\gamma$ ) для ГСА имеет вид

$$\gamma = \alpha_0(a_0 + a_1 + a_2 + a_6 + a_8 + a_{10}) + \overline{\alpha_1}a_3 + \overline{\alpha_2}a_4 + \alpha_3a_{12} + \overline{\alpha_4}a_5 + \overline{\alpha_5}a_7 + \overline{\alpha_6}a_8.$$

Таблица 1

Переходы УА

Номер перехода	$a(t)$	$\alpha$	$a(t+1)$
1	3	$\alpha_1$	12
2	12	$\overline{\alpha_1}$	2
3	13	$\alpha_0$	1
4	4	$\alpha_2$	13
5	5	$\alpha_4$	11
6	11	$\alpha_0$	7
7	7	$\alpha_5$	14
8	9	$\alpha_6$	8
9	10	$\alpha_0$	0
10	14	$\alpha_0$	3

Система логических функций  $z_1, \dots, z_r$  схемы  $F_3$  определяется по табл. 2, а ее объем  $V_3 < W/2$ , так как на выходе  $r = \lceil \log_2 q \rceil$  переменных, а на входе количество переменных равно  $m$ . Здесь скобки  $\lceil \rceil$  обозначают целую часть числа с округлением до большего значения. Для данной ГСА (см. рис. 1)

в схеме  $F_2(12)$  нет логических элементов, так как все операторы действия  $A_i \in \{A\}$  формируются при разных  $a(t+1)$  состояниях УА (табл. 2).

Таблица 2

**Выбор логических условий**

$\alpha$	$a(t)$		$\alpha$	$a(t)$		$\alpha$	$a(t)$
1	3		3	13		5	7
2	4		4	5		6	9

Сравнительная оценка УА через объем комбинационной схемы  $F_1(4)$  приведена в табл. 3 для двух вариантов реализации: через объем постоянного запоминающего устройства (ПЗУ) в битах и через количество входов программируемой логической матрицы (PLA). При этом объем ПЗУ для УА Мура равен  $V = m2^{m+q}$ , а для УА нового типа  $W = (m+1)2^{m+1}$ . Эффективность  $Q = W / V$ , а для  $PLAK = (m+q) / (m+1)$ .

Таблица 3

**Сравнительный анализ УА**

Номер перехода	Тип	$m$	$q$	$m+q$	$m+1$	$V$	$K$	$W$	$Q$
1	СП	3	2	5	4	128	1.2	64	2
2	ПА	4	5	9	5	2560	1.8	160	16
3	СА	5	8	13	6	$48 \cdot 10^3$	2.1	384	128
4	АС	6	11	17	7	$9 \cdot 10^5$	2.4	696	1024
5	ВС	7	14	21	8	$16 \cdot 10^6$	2.6	2048	$8 \cdot 10^3$
6	ОС	8	17	25	9	$03 \cdot 10^8$	2.7	4608	$6.4 \cdot 10^4$
7	УС	9	20	29	10	$5 \cdot 10^9$	2.9	$1 \cdot 10^4$	$0.5 \cdot 10^6$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Управляющий автомат с новой структурной организацией даже без средств контроля будет иметь более высокий уровень безотказности за счет значительного снижения логических элементов в комбинационных схемах по сравнению с одной схемой  $F_1$  УА Мура объемом  $V$ .

В новом УА появляется возможность существенного упрощения встроенных средств контроля. Например, код Грея может использоваться не только для контроля счетчика информационной подсистемы, но и для контроля переходов вне счетчика.

**СИНТЕЗ ВСТРОЕННЫХ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ**

Код  $y_1, \dots, y_m$  делится пополам при четном значении  $m$  и с перекрытием одного разряда при нечетном  $m$ . Затем в графе переходов производится перенумерация состояний вне счетчика таким образом, чтобы логическая сумма  $a(t)$  и  $a(t+1)$  по  $mod 2$  была равна единице как для младших, так и для старших разрядов. Если выполнение этого условия невозможно даже после изменения номеров (номер  $a(t)$ , относящийся к счетчику, не может быть изменен), то между  $a(t)$  и  $a(t+1)$  вставляется пустая вершина, номер которой по

специальной процедуре определяется так, чтобы условие кодов Грея выполнялось. По этой процедуре перед младшими разрядами и после старших разрядов добавляются дополнительные разряды, значение которых доопределяется так, чтобы условие Грея выполнялось как для младших, так и для старших разрядов независимо. Количество дополнительных разрядов для старшей группы (ст) и младшей группы (мл) зависит от величины  $m$  и определяется по табл. 4, где СД и МД – количество дополнительных разрядов старшей и младшей групп, а  $n/2$  – разрядность групп.

Таблица 4

Разделение кода

$m$	ст	мл	СД	МД	$n/2$
4	2	2	1	1	3
5	2	3	2	1	4
6	3	3	2	2	5
7	3	4	3	2	6
8	4	4	3	3	7

Для реализации процедуры контроля между каждыми двумя переходами графа вне счетчика ставятся пустые вершины (рис. 3), номера которых в двоичном позиционном коде (ДПК) определяются выбором конкретных значений (0 или 1) дополнительных разрядов. Для рассматриваемой граф-схемы рис. 1 в табл. 5 для каждого перехода приведены состояния  $a(t)$  и  $a(t+1)$ , соответствующие им коды Грея  $N(t)$  и  $N(t+1)$  и ДПК дополнительных вершин. В табл. 6 для старших и младших разрядов кодов определены значения дополнительных разрядов.

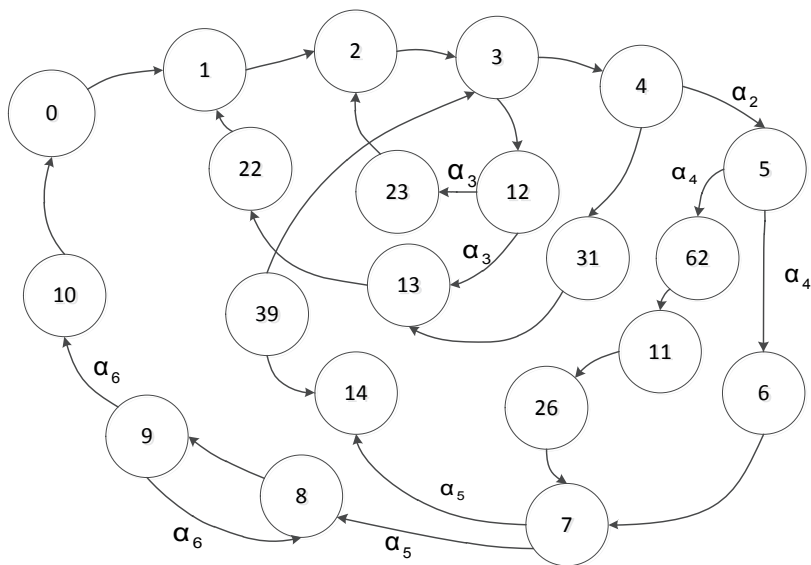


Рис. 3. Граф переходов с дополнительными вершинами

Для реализации процедуры контроля в структурную схему УА нужно ввести схему сложения по  $mod2$  разрядностью  $n/2$  для определения признаков, где  $\beta_1 = 1$ , если условие Грея выполняется для младших разрядов, а  $\beta_2 = 1$  когда это условие выполняется для старших разрядов. Значения определяются за два такта и фиксируются независимыми триггерами. Исправность УА в зависимости от значения  $\gamma$  фиксируется в двух случаях:

$$\overline{ERR} = \gamma(\overline{\beta_1}\beta_2 + \beta_1\overline{\beta_2}), \quad \overline{ERR} = \overline{\gamma}(\beta_1\beta_2).$$

Таблица 5

Кодирование состояний

№	$a(t) - a(t+1)$	$N(t)$	$N(t+1)$	ДПК
1	12 – 2	1010	0011	23
2	13 – 1	1011	0001	22
3	4 – 13	0110	1011	31
4	5 – 11	0111	1110	62
5	14 – 3	1001	0010	39
6	11 – 7	1110	1000	26
7	10 – 0	1111	0000	20

Таблица 6

Значения дополнительных старших и младших разрядов

$a(t)$	12	<u>0</u> 10	10 <u>1</u>	13	<u>1</u> 10	11 <u>1</u>		4	<u>0</u> 01	10 <u>1</u>
ДПК	23	010	111	22	010	110		31	011	111
$a(t+1)$	2	<u>0</u> 00	11 <u>0</u>	1	<u>0</u> 00	01 <u>0</u>		13	<u>0</u> 10	11 <u>0</u>

$a(t)$	5	<u>1</u> 01	11 <u>1</u>	14	<u>1</u> 10	01 <u>1</u>
ДПК	62	111	110	39	100	111
$a(t+1)$	11	<u>0</u> 11	10 <u>0</u>	3	<u>0</u> 00	10 <u>1</u>

$a(t)$	11	<u>1</u> 11	10 <u>0</u>	10	<u>0</u> 11	11 <u>0</u>
ДПК	26	011	010	20	010	100
$a(t+1)$	7	<u>0</u> 10	00 <u>0</u>	0	<u>0</u> 00	00 <u>0</u>

Символы 0 и 1 обозначают значения доопределяемых разрядов.

Весь процесс синтеза самоконтролируемых автоматов нового типа представлен на конкретном примере ГСА (см. рис. 1). Предложенный метод позволяет осуществить контроль за счет ввода одной схемы сложения по  $mod2$  половинной разрядности с малым числом дополнительных разрядов для осуществления контроля.

Анализ известных методов динамического контроля УА Мура и предлагаемого метода для УА нового типа позволяет сделать вывод о существенных

преимущества метода как по затратам встроенного оборудования, так и по быстродействию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод контроля с нетрадиционным применением кодов Грея при разделении кодов предыдущего и последующих состояний на группы старших и младших разрядов позволяет создавать высоконадежные, самоконтролируемые управляющие автоматы с минимальными объемами встраиваемых средств контроля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тоценко В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. – М.: Радио и связь, 1985. – 238 с.
2. Калявин В.П. Основы теории надежности и диагностики. – СПб.: Элмор, 1998. – 172 с.
3. Щербаков Н.С., Подкопаев Б.П. Структурная теория аппаратного контроля цифровых автоматов. – М.: Машиностроение, 1982.
4. Закревский А.Д., Поттосин Ю.В., Черемисинова Л.Д. Основы логического проектирования. Кн. 3. Проектирование устройств логического управления. – Минск: Беларусь, 2004. – 226 с.
5. Соловьев В.В., Климович А. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем. – М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 374 с.
6. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / под ред. В.В. Сапожникова и Вл.В. Сапожникова. – СПб.: Элмор, 2009. – 960 с.
7. Мухопад Ю.Ф. Микроэлектронные информационно-управляющие системы. – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – 407 с.
8. Сагалович Ю.Л. Кодирование состояний автомата // Теория дискретных управляющих устройств. – М.: Наука, 1982. – С. 175–182.
9. Сагунов В.Г. Алгоритмы технического диагностирования дискретных устройств. – М.: Радио и связь, 1990. – 111 с.
10. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Основы технической диагностики. – М.: Маршрут, 2004. – 322 с.
11. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 208 с.
12. Мухопад Ю.Ф. Микроэлектронные системы управления. – Братск: БрГУ, 2009. – 285 с.
13. Мухопад Ю.Ф. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени. – Новосибирск: Наука, 2015. – 176 с.
14. Патент 82888 Российская Федерация, G 06 F 9/00. Микропрограммный автомат / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2008149344/22; заявл. 15.12.2008; опубл. 10.05.2009, Бюл. № 13.
15. Патент 2527190 Российская Федерация, МПК G 06 F 9/00. Управляющий автомат / А.Ю. Мухопад, Ю.Ф. Мухопад, Д.Ц. Пунсык-Намжилов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения. – № 2013110986/08; заявл. 12.03.2013; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.
16. Мухопад Ю.Ф. Теория дискретных устройств. – Иркутск: ИрГУПС, 2010. – 172 с.

*Мухопад Юрий Федорович*, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – микропроцессорные информационно-управляющие системы. Имеет более 350 публикаций. E-mail: bts48@mail.ru



Мухопад Александр Юрьевич, доктор технических наук, и.о. доцента кафедры автоматизации производственных процессов Иркутского государственного университета путей сообщения. Основное направление научных исследований – синтез и контроль управляющих автоматов. Имеет более 60 публикаций. E-mail: jcmg@mail.ru

Пунсык-Намжилов Даба Цыренович, кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «ХИМТЕХ-ЮКОС». Основное направление научных исследований – аналого-цифровые системы. Имеет более 70 публикаций. E-mail: dablutf@mail.ru

### ***Control automata of complex engineering real time systems***\*

Yu.F. MUKHOPAD<sup>1</sup>, A.Yu. MUKHOPAD<sup>2</sup>, D.Ts. PUNSYK-NAMZHILOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), professor. E-mail: bts48@mail.ru

<sup>2</sup> Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D. Sc. (Eng.), associate professor. E-mail: jcmg@mail.ru

<sup>3</sup> ООО "HIMTEH-YUKOS", 99, Sovetskaya St., Tomsk, 634034, Russian Federation, director general, CHIMTECH-YUKOS, LTD, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: dablutf@mail.ru

Methods of dynamic control of control automata (CA) are discussed in the paper. In complex engineering real time systems CAs can be a big part of the automation equipment. CAs having the Moore structural organization even after minimization do not provide a sufficient level of reliability and safety. Dynamic control of CAs with special software is most effective for CAs separating a single Boolean condition of all conditions by the code of the previous state. A method of control with an innovative use of Gray codes in separating the codes on two sets relating to the counter and a multitude of peaks outside the counter is proposed. In the second set of state codes are divided approximately in half into groups of senior and junior categories. The number of the subsequent vertex is chosen so that of a logical sum of modulo codes of neighboring peaks of the least significant bits should be consistent with the Grey condition. Senior group codes of these peaks are defined in a special way to fulfill the same conditions. The rules of decision-making are derived. To implement control of the CA basis composition block only a scheme of logical addition and test rules of decision-making is introduced. The method enables you to create highly reliable, self controlled control automata with minimal embedded controls.

**Keywords:** algorithm, control, automata, diagnostics, coding information, engineering systems, mathematical model, logical sum

DOI: 10.17212/1814-1196-2017-1-53-62

### **REFERENCES**

1. Totsenko V.G. *Algoritmy tekhnicheskogo diagnostirovaniya diskretnykh ustroystv* [Technical diagnostics algorithms of discrete devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 238 p.
2. Kalyavin V.P. *Osnovy teorii nadezhnosti i diagnostiki* [Fundamentals of theory of reliability and diagnostics]. St. Petersburg, Elmor Publ., 1998. 172 p.
3. Shcherbakov N.S., Podkopaev B.P. *Strukturnaya teoriya apparatnogo kontrolya tsifrovyykh avtomatov* [Structural hardware verification of digital automations theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982.
4. Zakrevskii A.D., Pottosin Yu.V., Cheremisinova L.D. *Osnovy logicheskogo proektirovaniya*. Kn. 3. *Proektirovanie ustroystv logicheskogo upravleniya* [Logical design Basics. Bk. 3. Design of logical control devices]. Minsk, Belarus' Publ., 2004. 226 p.

---

\* Received 30 September 2016.

5. Solov'ev V.V., Klimovich A. *Logicheskoe proektirovanie tsifrovyykh sistem na osnove programmirovemykh logicheskikh integral'nykh skhem* [Logical design of digital systems based on FPGA]. Moscow, Hotline-Telecom Publ., 2008. 374 p.
6. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Trudy po teorii sinteza i diagnoza konechnykh avtomatov i releinykh ustroystv* [Works on the theory of synthesis and diagnosis of finite state machines and relay devices]. St. Petersburg, Elmor Publ., 2009. 960 p.
7. Mukhopad Yu.F. *Mikroelektronnye informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Microelectronic information control systems]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2004. 407 p.
8. Sagalovich Yu.L. Kodirovanie sostoyanii avtomata [Encoding-state machine]. *Teoriya diskretnykh upravlyayushchikh ustroystv* [Theory of discrete control devices]. Moscow, Nauka Publ., 1982, pp. 175–182.
9. Sagunov V.G. *Algoritmy tekhnicheskogo diagnostirovaniya diskretnykh ustroystv* [Algorithms for technical diagnostics of discrete devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1990. 111 p.
10. Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. *Osnovy tekhnicheskoi diagnostiki* [Basics of technical diagnostics]. Moscow, Marshrut Publ., 2004. 322 p.
11. Sogomonyan E.S., Slabakov E.V. *Samoproveryaemye ustroystva i otkazoustoichivyye sistemy* [Samoupravlennyye ustroystva i otkazoustoichivyye sistemy]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1989. 208 p.
12. Mukhopad Yu.F. *Mikroelektronnye sistemy upravleniya* [Microelectronic control system]. Bratsk, BrGU Publ., 2009. 285 p.
13. Mukhopad Yu.F. *Teoriya upravlyayushchikh avtomatov tekhnicheskikh sistem real'nogo vremeni* [Theory of control machines technical real-time systems]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2015. 176 p.
14. Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F. *Mikroprogrammnyi avtomat* [Firmware machine]. Patent RF, no. 82888, 2009.
15. Mukhopad A.Yu., Mukhopad Yu.F., Punsyk-Namzhilov D.Ts. *Upravlyayushchii avtomat* [Managing automatic]. Patent RF, no. 2527190, 2014.
16. Mukhopad Yu.F. *Teoriya diskretnykh ustroystv* [Theory of discrete devices]. Irkutsk, IrGUPS Publ., 2010. 172 p.