Технические науки

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ДИСКОВОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ
МЕХАНОАКТИВАТОРЕ (ЭДМА)**

Беззубцева М.М., Волков В.С.

*Санкт-Петербургский государственный
аграрный университет, Санкт-Петербург,
e-mail: vol9795@yandex.ru*

В результате теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что механоактивация вторичного сырья в дисковом электромагнитном механоактиваторе (ЭДМА) позволяет интенсифицировать технологический процесс, улучшить качество продукции при одновременном снижении энергетических затрат и ресурсосбережении.

$$F = -\frac{3}{256} H^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu - 1)^3} ((13\mu + 11) + 9(3\mu + 5)\cos 2\phi), \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость шаров; H – напряжённость магнитного поля, принимающая значение H_1 во внешней части камеры измельчителя, либо значение H_2 – во внутренней части измельчителя; R_0 – радиус шаров; ϕ – угол деформации структурной цепочки.

Анализ показывает, что сила взаимодействия будет принимать максимальное значение при величине угла деформации $\phi = 0$:

$$F_n = \frac{3}{356} H_n^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^3} (-(13\mu + 11) + 9(\mu + 35)\cos 2\phi) + \frac{r_n}{2R_0} ((29 + 67\mu) + (171 - 117\mu)\cos 2\phi). \quad (3)$$

Равномерность распределения силовых нагрузок обеспечивается созданием в зоне «слоя скольжения» индукции от 0,25 до 0,3 Тл. Условия равномерности подтверждены моделированием и оптимизацией процесса измельчения и механической активации в среде программного комплекса ANSYS с использованием метода конечных отношений.

Разработанная методика использована при проектировании ЭДМА, отвечающего требованиям производства. В результате исследований выявлено соответствие разработанной конструкции ЭДМА поставленной цели рационального использования вторичных ресурсов посредством измельчения и механоактивации, путем создания эффективных способов измельчения и механоактивации с разработкой оборудования нового типа, обеспечивающего интенсификацию и автоматизацию процессов, улучшение качественных показателей продукции при одновременном повышении энергоэффективности и ресурсосбережении.

Повышение энергетической эффективности производства обеспечивается за счет создания в ЭДМА [1, 2] равномерных энергетических и силовых нагрузок на обрабатываемый материал.

В результате исследований физико – механических процессов в рабочем объеме ЭДМА [3] выявлено, что диспергирование и механоактивация вторичного сырья в ЭДМА осуществляется в средней зоне рабочего объема – в «слое скольжения». При этом силовое взаимодействие между ферроэлементами определяется величиной индукции в рабочем объеме и может быть определено из выражения, полученного на основании развития гипотезы Максвелла.

Для определения силы воздействия двух сферических ферромагнитных элементов в однородном магнитном поле, применяется формула:

$$F(0) = -\frac{3}{32} H^2 R_0^2 \frac{(\mu - 1)^2}{(\mu + 2)^3} (5\mu + 7). \quad (2)$$

При определении сил следует, однако учесть, что взаимодействия ферроэлементов в цепочках происходит через прослойку обрабатываемого продукта. Если исходный размер частиц продукта принять равным r_n , то формула (1) примет вид:

Список литературы

1. Беззубцева М.М. Электромагнитные измельчители. Теория и технологические возможности: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб.: СПбГАУ, 1997. – 24 с.
2. Беззубцева М.М., В.С.Волков. Теоретические основы электромагнитной механоактивации. – СПб: Изд-во СПбГАУ, 2011. –250 с.
3. Электромагнитный измельчитель: патент 84263 Российской федерация, МПК⁶ В02С19/18. / Волков В.С.: заявитель и патентообладатель Волков В.С. № 2008151900/22; заявл. 23.12.2008; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19. – 11 с.

СИНТЕЗ НАДЕЖНЫХ АВТОМАТОВ ДЛЯ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Мухопад А.Ю.

*Иркутский государственный университет путей
сообщения, Иркутск, e-mail: jcmg@mail.ru*

Дан сравнительный анализ МПА Мура и оригинального автомата авторов с выделяемыми логическими условиями. Предложены новые эффективные методы контроля, реализуемые в МПА с новой структурной организацией.

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

Вопросы обеспечения безотказности ИУС не могут решаться без обеспечения надежности микропрограммных автоматов управления (МПА), которые в структуре ИУС могут составлять порядка 50% в виде БИС и СБИС. Наиболее результативны структурные методы повышения надежности, связанные не только со снижением числа логических элементов на функциональном уровне, но и на использовании встроенных подсистем динамического контроля.

Анализ ИУС и самих автоматов управления целесообразно проводить на основе структурных моделей сложных систем. Используем модель ИУС Ю.Ф. Мухопода в виде пяти взаимосвязанных блоков: функционального, информационного, адресного, логического и управляющего [1, 2].

Структурная организация автоматов управления

Типовая структура МПА с правилом функционирования автоматов Мура [3] включает следующие блоки:

ОУ – операционное устройство (объект управления), выполняющее для МПА роль логической подсистемы, т.к. именно к ней отнесены датчики и схемы формирования двоичных сигналов $\{\alpha\}$, которые являются входными сигналами МПА.

И – регистры памяти, составляющие основу информационного блока МПА;

А – комбинационная схема F_1 для определения кода $Y = y_m \dots y_2 y_1$ состояния автомата $a(t+1)$ по коду $X = x_m \dots x_2 x_1$ состояния $a(t)$ и логическим условием $\{\alpha\} = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_q$. F_1 – адресный блок МПА;

Самым простым методом реализации F_1 является считывание кода Y по конкатенации $\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_q x_m \dots x_2 x_1$, которая рассматривается как адрес ПЗУ. При реализации адресного блока на ПЗУ или ПЛМ условный объем памяти $V = m2^{m+q}$.

Φ – комбинационная схема F_2 для формирования управляющих команд $A_1 A_2 \dots A_k$ 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 $\tau_1(t) \wedge \tau_2(t) = \emptyset$. Число состояний автомата N определяет разрядность (m) кодов X и Y из соотношения $N \leq 2^m$. Поэтому сложность МПА определяется значениями m, q для всех блоков ($\Phi, И, Л, А$) при фиксированной структуре БС классических МПА Мура [1].

По степени сложности адресного блока в соответствии с инженерной классификацией [4] МПА подразделяются на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней сложности (СА) и высокой сложности (ВС) автоматы. В табл. 1 дана оценка объема ПЗУ в килобитах. Как видно из табл. 1 для СА автоматов величина V может приближаться к мегабиту, а для ВС составляет десятки мегабит.

Таблица 1

Основные параметры автоматов

	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	125
3	СА	5	12	17	6	640	0,320	2000
4	ВС	6	16	22	7	24.000	0,768	31250
	1	2	3	4	5	6	7	8

При проектировании МПА стремятся в первую очередь упростить А– подсистему за счет минимизации системы m булевых функций F_1 и реализации их на ПЛМ или ПЛИС с конкатенацией входных переменных $\{\alpha\} \{x\}$ или представления системы F_1 параллельно последовательной структурой комбинационных схем (декомпозиция), в которой каждая из подсхем имеет число переменных на входе меньше чем $(m + q)$.

Первый подход эффективен для СП и ПА автоматов, но для СЛ и ВС автоматов снижение сложности А-блока не превосходит 15%. Второй подход отличается высокой наукоемкостью, т.к. при проектировании необходимо в графе переходов найти несовместимые подграфы, решить задачу оптимальной раскраски графов

и др. Однако эффект для СЛ и ВС автоматов также не значительный.

Эффективный метод декомпозиции МПА предложен в работах [5,6], основанный на разделении не графов переходов, а самой исходной граф-схемы алгоритма (ГСА). Метод снижает объем ПЗУ (ПЛМ) в 1,5–1,7 раза для ВС и СЛ автоматов. Кардинальный подход предложен в работах [4, 7, 8], основанный на использовании оригинальной структуры МПА с определением Y по коду X при использовании всего одного логического условия $\alpha_j \in \{\alpha\}$. Номер j для α_j определяется по коду $a(t)$. Объем ПЗУ такого А-блока определяется величиной $W = m2^{m+1}$. Значение W не зависит от числа логических условий q . Выигрыш в объеме ПЗУ, обозначенный символом Q , и величины W для всех типов авто-

матов 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 превысят сложности новой комбинационной схемы F_1 с $(m+1)$ переменной на входе.

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

Новые методы самоконтроля

В работе [2] с целью уменьшения числа активных элементов в числовом блоке ПЗУ предложено использовать представление хранения кода с фиксированным числом единиц как результат независимой дешифрации частей m -разрядного кода ДПК. Код назван геометрическим, т.к. публикация появилась до кодов kCn с фиксированным (k) числом единиц в n -разрядном коде. Более подробно метод изложен в работе [9]. 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 [10] контроля МПА с МГК определяется тем, что код МГК используется только для представления $a(t+1)$, который 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 3-х разрядов допустима лишь 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

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

Предложенный оригинальный метод самоконтроля [10] наиболее эффективен для новой структуры МПА, т.к. при использовании ПЗУ объем памяти вместо $W = m2^{m+1}$ станет равным $W = (2m+1)2^{m+2}$, здесь $(m+1)$ – разрядность МДК, а $2m$ – разрядность МГК. Для типового

МПА Мура при использовании МГК и МДК объем памяти $W = 2m2^{m+q}$.

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

1. Проверка отсутствия ошибок в МГК для каждой дублированной F_1 обозначенных как F_1^1 и F_1^2 . Если в каждой схеме нет ошибок, 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 производится 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, т.к. в таких автоматах нельзя 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 $a(t+1) = 1 + \infty a(t)$. Здесь ∞ признак безразличного выбора значения 0 .

– для этих переходов предусматривается счетчик с кодом Грея, который выполняет одновременно 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 половины 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 $x_1 x_2 \dots x_m$, то при вычислении Y_1 и Y_2 возможно появление неопределенности. Для ее ликвидации используется еще одна двоичная переменная Y , 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 .

$$A_0 \downarrow A_1 \overline{\alpha_1} \uparrow A_2 \overline{\alpha_2} \uparrow A_3 A_4 \downarrow \downarrow A_5 A_6 \overline{\alpha_3} \uparrow A_7 A_8 \overline{\alpha_4} \uparrow \downarrow A_9 A_{10} A_{11} \alpha_5 \uparrow A_{12} A_{13} A_{14} \overline{\alpha_6} \uparrow \downarrow A_{15} A_k.$$

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 рисунке, на котором двойными стрелками отмечен непрерывный путь через состояния 0, 1, 2, ..., 15, 0. Такому пути может быть сопоставлен счетчик, работающий в коде Грея (табл. 2), тогда схема F_1 реализует только 6 переходов по табл. 3. Заметим, что все переходы в F_1 реализуются по условию ∞_j , т.к. по ∞_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: $x_1 x_2$ ($00 \rightarrow 01, 00$) и $x_3 x_4$ ($01 \rightarrow 01, 11$). Булевы функции y_1, y_2, y_3, y_4 определяются по картам Карно на основании табл. 4. Реализация этих функций тривиальна.

$$y_1 = (x_1 \overline{x_2} + \overline{\gamma} x_2) \infty; \quad y_2 = (\overline{\gamma} x_1 \overline{x_2}) \infty;$$

$$y_3 = \overline{\gamma} (x_4 + x_3) \infty; \quad y_4 = \overline{\gamma} x_3 x_4 \infty.$$

Таблица 2

0	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

$a(t)$	α	$a(t+1)$
1	∞_1	5
2	∞_2	1
6	∞_3	5
8	∞_4	15
11	∞_5	9
14	∞_6	1

При реализации МПА Мура по традиционной схеме с дублированием F_1 при $m=4, q=6$ общий объем двух схем составит более 8 кб, т.к. для каждой схемы $W = m2^{m+q}$. В новом автомате необходима одна схема с объемом $W = m2^{m+1} = 0,127$ кб и тривиальная дублирующая схема для реализации уравнений Y . При больших значениях m, q преимущество предла-

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

гаемого метода самоконтроля и новой структуры МПА будут еще более значимыми.

Таблица 4

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	$y_4 y_3 y_2 y_1$

В представленной статье в большей мере рассматривались автоматы Мура. Метод построения МПА Мили с новой структурной организацией предложен в работе [11].

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

Заключение

Предложенная авторами новая структурная организация микропрограммных автоматов дает 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. Мухопад Ю.Ф. Теория дискретных устройств: учебное пособие. – Иркутск: ИрГУПС, 2010. – 172 с.
2. Мухопад Ю.Ф. Проектирование специализированных микропроцессорных вычислителей. – Новосибирск: Наука, 1981. – 161 с.
3. Соловьев В.В., Климович А. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 374 с.
4. Мухопад А.Ю. Структурный синтез автоматов управления систем реального времени: автореф. дис. ... канд. – Братск, 2009. – 19 с.
5. Мухопад Ю.Ф. Микроэлектронные системы управления. – Братск: БрГУ, 2009. – 285 с.
6. 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.
7. Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф. Микропрограммный автомат. – Патент на полезную модель № 82888. – БИ № 13, 2009.
8. Mukhopad Yr.F., Mukhopad A.Yr. Microelectronic controlling of realtime complicated technical systems // International journal of applied and fundamental research. – 2009. – № 2. – P. 26–29.
9. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Кравцов Ю.М. Теория дискретных устройств ж.д. автоматики, телемеханики и связи. – М.: Транспорт, 2001. – 368 с.
10. Мухопад Ю.Ф., Мухопад А.Ю., Бадмаева Т.С. Самоконтролируемый автомат управления. – Патент РФ № 63588. – БИ № 15, 2007.
11. Мухопад Ю.Ф. Мухопад А.Ю. Методы синтеза автоматов управления на больших интегральных схемах // Проблемы информатики. – Новосибирск: СОРАН, 2011. – № 4. – С. 17–28.