

УДК 681:656.25

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

© Ю. Ф. Мухопад¹, А. Ю. Мухопад¹, Д. Ц. Пунсык-Намжилов²,
А. С. Маниковский³

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

²ООО «Сибпроект»,
634034, г. Томск, Советская, 99, кв. 98

³Забайкальский институт железнодорожного транспорта,
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11

E-mail: bts48@mail.ru, jcmg@mail.ru, dablttf@mail.ru, andrey-18@mail.ru

В целях снижения сложности комбинационных схем предложена новая методология синтеза управляющих автоматов, основанная на вводе ограниченного числа пустых операторов в граф-схему управления, и три способа организации адресной подсистемы: через ввод счётчика состояний и унитарное кодирование, ввод в структуру управляющего автомата мультиплексора для выбора одного логического условия из всего множества $\{\alpha\}$ и ввод в схему управляющего автомата адресного блока из q двухвходовых элементов «И», одного «ИЛИ» и RS-триггера для выбора одного $\alpha_j \in \{\alpha\}$. Во всех вариантах реализации управляющих автоматов число входов в программируемую логическую матрицу уменьшается в 1,5–3 раза в зависимости от сложности алгоритма управления.

Ключевые слова: информационно-измерительные системы, управляющие автоматы, синтез автоматов.

DOI: 10.15372/AUT20210408

Введение. Автоматизированные вычислительные и информационно-измерительные системы составляют основу сложных кибернетических комплексов [1–4], поэтому управление ими реализуется через непростые процедуры, представленные граф-схемами алгоритмов (ГСА) управления. Уровень сложности таких систем не имеет количественного определения, но для управляющих автоматов (УА) в работе [5] предложена классификация на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней сложности (СА), сложные (АС), высокой сложности (ВС), особо сложные (ОС) и ультрасложные (УС) автоматы. Классификация автоматов проведена по количеству разрядов (m) и количеству логических условий (q) $\alpha_1, \dots, \alpha_q$ в табл. 1, где V — объём постоянного запоминающего устройства (ПЗУ), определяемый как $V = m_p 2^{m+q}$, m_p — реальная разрядность типовой большой интегральной схемы (БИС) ПЗУ, равная 4 или 8. Характеристики W , Q , K будут определены далее.

В вычислительных и информационно-измерительных системах мехатроники, робототехники, транспортных средств, технологических комплексов используются в основном управляющие автоматы Мура и Мили [6–15]. Математическая запись функций управляющих автоматов Мура имеет вид

$$a(t+1) = F_1(a(t), \alpha_1, \dots, \alpha_q), \quad A(t+1) = F_2(a(t)),$$

где $a(t)$, $a(t+1)$ — предыдущее и последующее состояния автомата; $A(t+1)$ — исполняемая команда; F_1 — система булевых функций, определяющих переходы от $a(t)$ к $a(t+1)$; F_2 — функции формирования управляющих команд A_0, \dots, A_k .

Таблица 1

Характеристики управляющих автоматов

№	Тип	m	q	$m + q$	m_p	V	$m + 1$	W	Q	K
1	СП	3	3	6	4	256	4	64	4	1,5
2	ПА	4	6	10	4	2 кб	5	256	8	2,0
3	СА	5	9	14	8	128 кб	6	512	256	2,3
4	АС	6	12	18	8	2 Мб	7	1 кб	$2 \cdot 10^3$	2,6
5	ВС	7	15	22	8	32 Мб	8	2 кб	$1,6 \cdot 10^4$	2,7
6	ОС	8	18	26	8	0,5 Гб	9	4 кб	$1,2 \cdot 10^5$	2,9
7	УС	9	21	30	12	12 Гб	10	12 кб	10^6	3

Методология синтеза УА была определена в 1950 г. К середине 1990 гг. новые разработки были посвящены в основном реализации УА на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), перестраиваемых матричных кристаллах (ПМК) и частично на программируемых логических матрицах (ПЛМ) [14, 15]. Далее будут использоваться только БИС ПЗУ и ПЛМ для сравнительного количественного анализа УА на структурном уровне. На функциональном уровне, кроме ПЛМ, необходимо рассматривать реализацию на ПЛИС и ПМК.

В существующей парадигме во всех известных решениях сокращение количества элементов схем переходов УА достигается через сокращение числа состояний $a(t)$, декомпозицию граф-схем алгоритмов управления и минимизацию систем булевых функций. За все годы развития методологии синтеза достигалось обычно снижение аппаратной реализации УА до 1,2–1,5 раза, причём чем сложнее УА, тем меньше значение коэффициента снижения сложности. Для более высокого уровня минимизации необходимо изменить методологию синтеза УА [6–14].

Анализ управляющих автоматов с традиционным способом определения состояний. Перед анализом УА Мура и Мили целесообразно рассмотреть структурную организацию управляющих автоматов по модели сложной технической системы (СТС) [16], представленной в виде полного графа из пяти вершин (рис. 1), сопоставленных подсистемам: функциональной (Φ), информационной (И), логической (Л), адресной (А) и управляющей (У). Входы $\{x\}$ и выходы $\{y\}$ СТС принадлежат подсистеме Φ .

Для УА Мура имеем следующие назначения блоков: Φ — схема переходов F_1 ; И — регистры памяти; Л — устройства, определяющие значения логических условий; У — устройство формирования команд. Адресной (А) подсистемы в УА Мура нет, поэтому всё подмножество логических условий совместно с разрядами кода состояний определяет сложность функций F_1 .

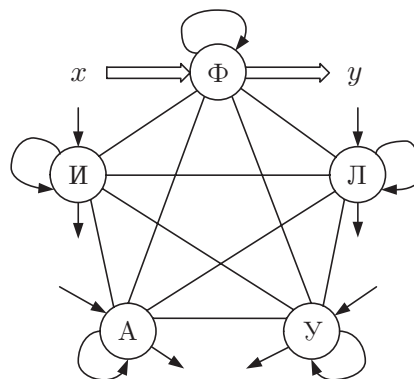


Рис. 1. Пятиблоковая модель СТС

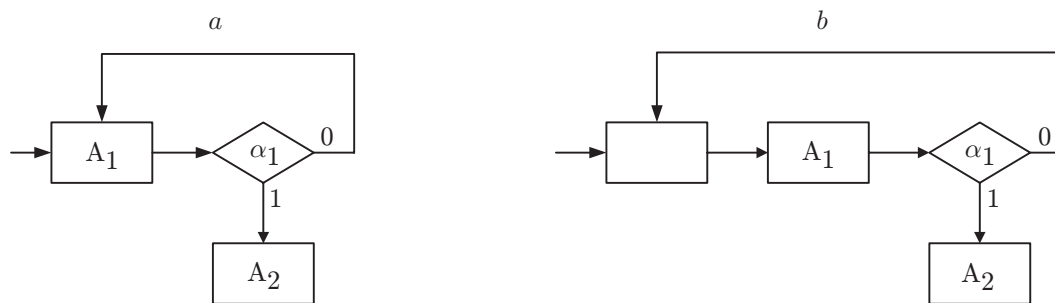


Рис. 2. Ликвидация петли в операторной схеме ГСА: *a* — схема с петлёй; *b* — ввод пустого оператора

При существующей методологии синтеза УА по ГСА определяется граф переходов от $a(t)$ к $a(t+1)$ с проверкой логических условий. Для УА Мура состояния соответствуют операторам действия A_0, \dots, A_k , поэтому по графу переходов устанавливается объём ПЗУ программной реализации функций F_1 . При аппаратной реализации F_1 на ПЛМ число её входов $n \geq m + q$. Для сложных управляющих автоматов как V , так и n — немалые величины.

Для УА Мура функционально-тождественные преобразования ГСА осуществляются через ввод пустых операторов в следующих случаях: для ликвидации петель (рис. 2), если между α_i и α_j нет операторов действия, когда к логическому условию α_j передаётся управление от двух или более операторов, при ограничении числа входов операторов до двух.

Математическая запись функций нового УА, определённого по ГСА с пустыми операторами, будет иметь вид $a(t+1) = F_1(a(t), \alpha_j)$, $A(t) = F_2(a(t))$, $\alpha_j = F_3(a(t))$.

Предлагается унитарное кодирование состояний с применением второго дешифратора состояний. Так как после ввода пустых операторов подаётся только одно логическое условие на схему переходов, то в новом УА с унитарным кодированием целесообразно использовать счётчик вместо регистра памяти $a(t)$.

Управляющий автомат с новой структурной организацией представлен на рис. 3: Rg — регистры памяти; F_1 — схема переходов; DC — дешифраторы состояний; ОУ — объект управления; & — элементы «И» для парафазной передачи кода $a(t+1)$ на счётчик Сч, хранящий код $a(t)$; БО — блок определения необходимости прибавления «1» к содержимому счётчика Сч через коэффициент (γ); БС — блок формирования сигналов синхронизации τ_1, \dots, τ_k . Представленный на рис. 3 управляющий автомат отличается от УА Мура только использованием второго дешифратора для преобразования двоичного позиционного кода в унитарный код. Этот вариант реализации является фактически новым УА, так как функция F_1 сформирована по ГСА с вводом пустых операторов, тогда при $(m+q)$ -входах на F_1 потребуется использовать только часть из 2^{m+q} выходов DC.

Система булевых функций F_1 и функция определения γ представлены следующими уравнениями:

$$y_1 = \bar{a}_5 a_{10} + \alpha_6 a_{11} + a_{13} + a_{16}, \quad y_2 = \bar{a}_1 a_2 + a_{13} + a_{14}, \quad y_3 = \bar{a}_1 a_2 + \bar{a}_6 a_{11} + a_{14},$$

$$y_4 = \bar{a}_1 a_2 + \bar{a}_5 a_{10} + \bar{a}_6 a_{11} + a_{13}, \quad y_5 = \bar{\beta}_4 a_8.$$

Для упрощения вычисления коэффициента γ целесообразно все \bar{a}_j заменить обозначением β_j в переходах со счётчиком, тогда функция γ определяется как логическая сумма всех состояний УА, относящихся к счётчику, а схема F_1 будет реализовывать только переходы вне счётчика: $\gamma = \alpha(a_0 + \dots + a_{11}) = \bar{y}_4 + \bar{y}_3$.

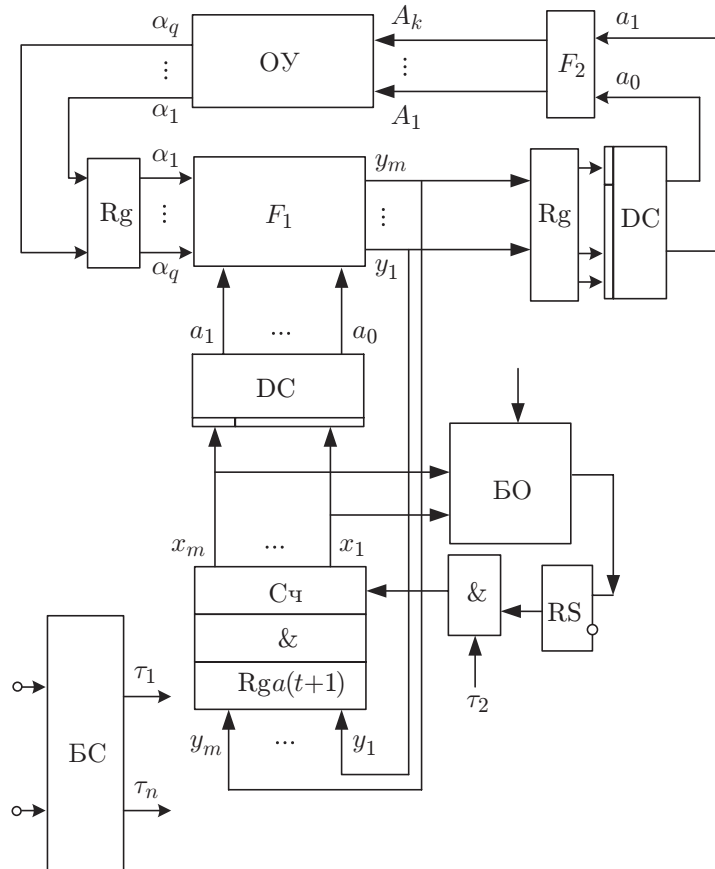


Рис. 3. Структурная схема УА с унитарным кодированием и счётчиком состояний

Для реализации уравнений потребуется всего 4 двухвходовых элемента «И» и 10 двухвходовых элементов «ИЛИ».

Упрощение реализации нового УА получено благодаря преобразованиям: модификации ГСА за счёт ввода пустых операторов (A_{α}); использованию унитарного кодирования; применению счётчика состояний $a(t)$. Унитарное кодирование использовалось только для УА без логических условий [6]. В предлагаемом варианте нового УА Мура ограничения на количество логических условий q отсутствуют.

Управляющие автоматы с новой структурной организацией. В [17] определена новая структурная организация УА с адресной подсистемой в виде мультиплексора, третьей комбинационной схемы и регистра для определения и фиксации адреса логического условия при выборе одного $\alpha_j \in \{\alpha\}$.

Для определения адреса мультиплексора, задающего адрес z_1, \dots, z_r логического условия $\alpha_j \in \{\alpha\}$, достаточно использовать только код y_1, \dots, y_m состояния $a(t)$ без учёта значений логических условий.

Так как в новом варианте реализации УА используется только одно значение $\alpha_j \in \{\alpha\}$ в схеме F_1 , то её новый объём $W = m_p 2^{m+1}$. Эффективность снижения затрат на реализацию схемы переходов определяется коэффициентом $Q = V/W = 2^{q-1}$. Количество входов ПЛМ n при аппаратной реализации УА снижается в K раз, где $K = (m+q)/(m+1)$. Для всех типов УА даны значения Q, K, W в табл. 1. Как видно, новый управляющий автомат существенно превосходит УА Мура по эффективности, определяемой коэффициентами Q и K .

Благодаря оригинальной структурной организации и высокой эффективности нового

УА по аналогии с УА из [6–14] предложенному автомату присвоено собственное имя — автомат Мухопада.

Таким образом, переход от существующей парадигмы синтеза УА к новой парадигме (стратегии), основанной на целенаправленном увеличении числа состояний, обеспечивает создание высокоэффективных автоматов нового типа.

Управляющие автоматы с новым определением состояний. Управляющий автомат Мухопада оригинален по структурной организации [17]: его эффективность достигнута за счёт увеличения количества блоков и связей при сохранении представления состояний $a(t)$ через операторы действия A_0, \dots, A_k .

В [18] предложен принципиально новый метод определения состояний УА за счёт разметки входов как операторов действия, так и логических условий. В [19] представлена новая организация УА с меньшими затратами оборудования, достигнутыми при новом определении состояний УА.

Соответствующий вариант реализации УА представлен на рис. 4: АБ — адресный блок из q двухвходовых элементов «И», одного «ИЛИ» и RS-триггера; БА — блок анализа определения принадлежности выхода дешифратора состояний DC к $\{\alpha\}$; выход БА

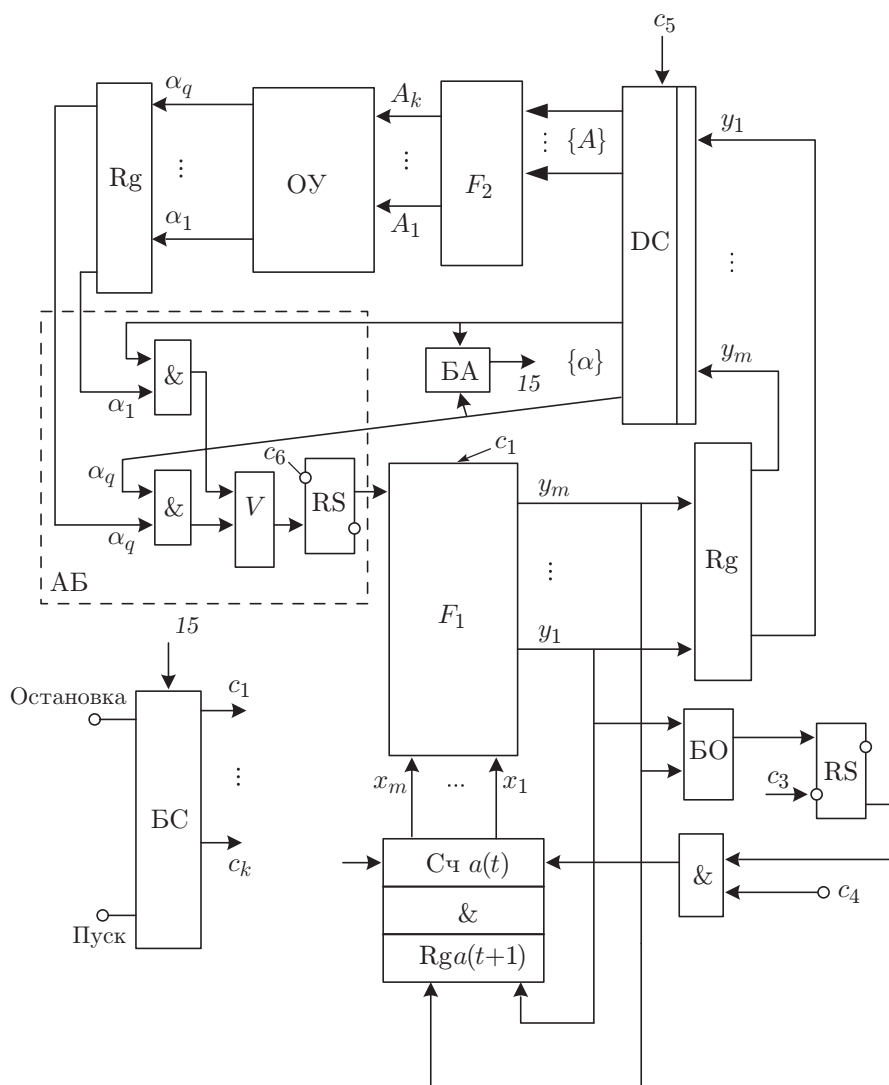


Рис. 4. Структурная схема нового управляющего автомата Мухопада

является дополнительным входом блока синхронизации БС. Выходы дешифратора ДС разделены теперь на два непересекающихся подмножества: для выбора $\{\alpha\}$ и управляющих команд $\{A\}$. При этом в такой реализации УА может формировать сигналы управления как в режиме УА Мура, так и в режиме УА Мили только при одной схеме переходов F_1 , а не при двух схемах, как в УА Мили.

В режиме УА Мили обеспечивается более высокий уровень быстродействия при переходах от $a(t)$ к $a(t+1)$ за счёт выбора $\{\alpha\}$ без выдержки времени T , так как переход реализуется за время сигнала $\tau \ll T$ и нет необходимости задержки исполнения команд на время T , если состояния УА соответствуют выбору $\alpha_j \in \{\alpha\}$.

На рис. 5 представлен пример реального варианта информационно-измерительной системы [20] в виде комплекса блоков контроля и диагностики ПЗУ с ультрафиолетовым или электрическим стиранием информации. Структура и функционирование такой системы описаны в [21]: Дш — дешифратор; Сх И — многоразрядная схема «И» (схемы «И»); ФЛС — формирователь логических сигналов; Сч — счётчик; БУ — буферное устройство; БПР — блок принятия решения; БИ — блок индикации; ГТИ — генератор тактовых импульсов; СПЗУ (Θ_i) — эталонное ПЗУ с i -й программой контроля; СПЗУ (И) — испытуемое ПЗУ; ФВД — формирователь временных диаграмм; МПА — микропрограммный автомат.

Оригинальность реализации определяется двумя факторами: применением нескольких ПЗУ для контроля одного испытуемого ПЗУ; использованием трёхуровневой управляющей подсистемы.

Управление информационно-измерительной системой реализуется системой взаимодействующих блоков: МПА, ФВД [22] и БУ. Граф-схема алгоритма управления для реализации БУ с разметкой состояний по новому принципу представлена на рис. 6. Описание всех операторов действия V_i , C_i и логических условий дано в работе [21] и здесь не приводится.

При реализации ГСА через программную версию УА Мура потребовалось бы ПЗУ блока БУ объёмом $V = m_p 2^{m+q} = 8 \cdot 2^{6+12} = 2$ Мб. При декомпозиции ГСА на 5 частей получаемое суммарное количество разрядов кода состояний $m = 10$ и при 4 логических условиях в каждой части с $m_p = 12$ объём ПЗУ блока БУ будет уменьшен в 64 раза. При реализации БУ как УА нового типа новый объём $W = 8 \cdot 2^{6+1} = 1$ кб. По сравнению с УА Мура объём снижается не в 64, а в 10^6 раз; число входов ПЛМ при аппаратной реализации снизится в 2,7 раза, так как $n = (m+q)/(m+1) = (6+12)/(6+1) = 2,7$.

В новом УА Мухопада потребовалась только одна схема F_1 с входной конкатенацией $(\alpha_j a(t))$ при работе как в режиме УА Мура, так и в режиме УА Мили вместо двух схем с конкатенацией $(\alpha_1, \dots, \alpha_q a(t))$ в типовом УА Мили.

Дальнейший этап синтеза при известной структуре (см. рис. 3) и выбранной разметке состояний не имеет существенных особенностей по сравнению с известной методологией синтеза УА.

Варианты программной и аппаратной реализаций управляющего автомата с новым определением состояний на сегодня являются эффективными и простыми из всех известных управляющих автоматов и могут применяться как основа системы управления сложными техническими системами [23, 24].

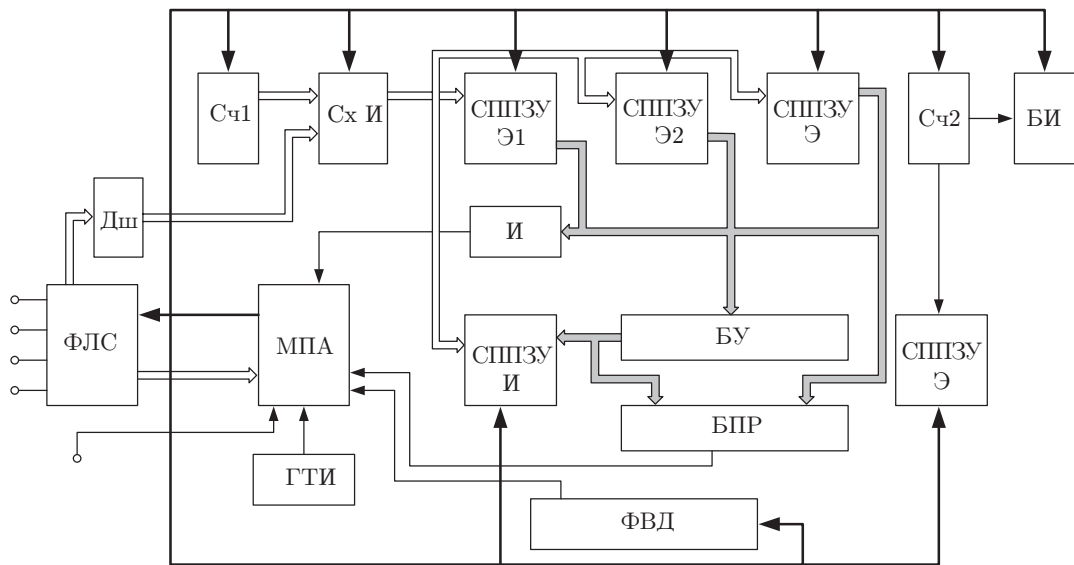


Рис. 5. Структурная схема контроля ПЗУ

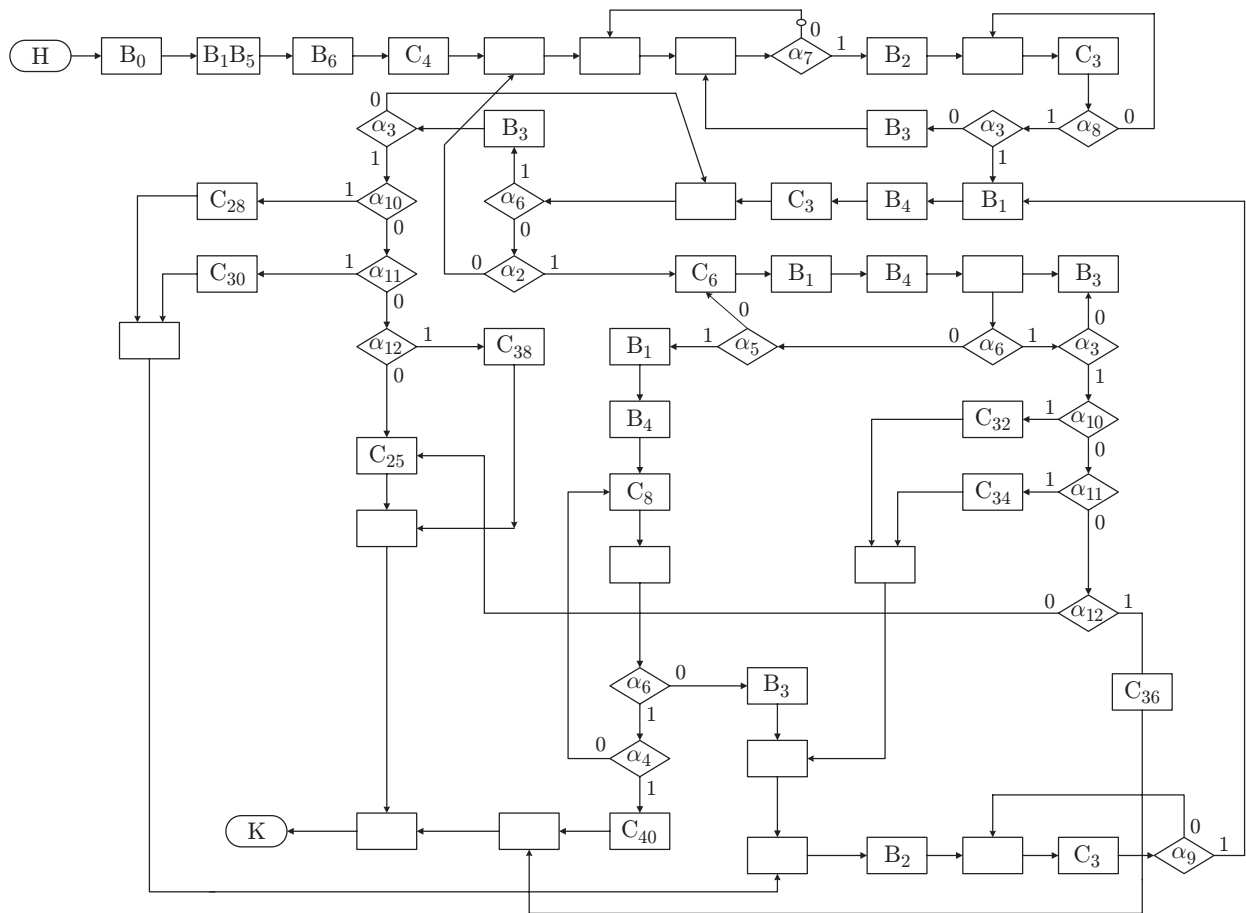


Рис. 6. Граф-схема алгоритма для синтеза блока управления БУ

Заключение. Проведён системный анализ автоматов Мура и Мили и показано, что сложность реализации комбинационной схемы переходов из предыдущего $a(t)$ в последующее $a(t+1)$ состояние определяется отсутствием адресной подсистемы. Новая методология синтеза управляющего автомата обуславливается тремя способами организации адресной подсистемы с целенаправленным увеличением количества состояний через ввод ограниченного числа пустых операторов:

- унитарное кодирование информации после преобразования граф-схемы алгоритмов;
- ввод в структуру управляющего автомата мультиплексора;
- ввод в схему управляющего автомата адресного блока из q двухвходовых элементов «И», одного «ИЛИ» и RS-триггера.

Целенаправленное увеличение количества состояний даёт возможность выбора одного (единственного) значения $\alpha_j \in \{\alpha\}$ и существенного уменьшения числа входов в комбинационной схеме переходов, обеспечивающего снижение её сложности в 2^{q-1} раз.

В третьей структуре УА выбор одного $\alpha_j \in \{\alpha\}$ осуществляется дешифратором состояний $a(t)$, подмножество выходов $\{\alpha\}$ которого не зависит от подмножества выбора команд управления A_0, \dots, A_k . Все три варианта позволяют реализовать УА с малыми затратами элементов схемы переходов, причём самым эффективным (по оценке затрат на схему переходов) и в то же время простым является третий вариант.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Д. А. Кибернетика // Проблемы управления. 2016. № 1. С. 73–81.
2. Белоконь С. А., Деришев Д. С., Золотухин Ю. Н. и др. Управление движением гибридного летательного аппарата в переходных режимах // Автометрия. 2019. 55, № 4. С. 37–48. DOI: 10.15372/AUT20190405.
3. Конюх В. Л. Особенности управления подземными роботами // Автометрия. 2007. 43, № 6. С. 116–127.
4. Пасик В. Ш. Имитационный метод для численного анализа систем управления с обратной связью // Автометрия. 1999. № 1. С. 100–104.
5. Мухопад А. Ю. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени. Новосибирск: Наука, 2015. 176 с.
6. Баркалов А. А., Титаренко Л. А. Прикладная теория цифровых автоматов. Донецк: ДонНТУ, Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2013. 320 с.
7. Лазарев В. Г., Пийль Е. И. Синтез управляющих автоматов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 328 с.
8. Горбатов В. А., Горбатов А. В., Горбатова М. В. Теория автоматов. М.: Астрель, 2008. 699 с.
9. Закревский А. Д., Поттосин Ю. В., Черемисинова Л. Д. Логические основы проектирования дискретных устройств. М.: Физматлит, 2007. 592 с.
10. Кудрявцев В. Б., Алешин Ф. Б., Подколзин А. С. Теория автоматов. М.: Юрайт, 2018. 320 с.
11. Ожиганов А. А. Теория автоматов. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 84 с.
12. Ульман Д. Д., Мотвани Р., Хопкрофт Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений. М.: Вильямс, 2016. 528 с.
13. Ubar R. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source) / R. Ubar, J. Raik, H.-T. Vierhaus. N. Y.: IGI Global, 2011. 578 p.
14. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств /Под ред. В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. СПб.: Элмор, 2009. 594 с.

15. **Максфилд К.** Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы. М.: Додэка-XXI, ДМК-Пресс, 2015. 408 с.
16. **Мухопад Ю. Ф.** Теория дискретных устройств. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 172 с.
17. **Пат. 82888 U1 РФ.** Микропрограммный автомат /А. Ю. Мухопад, Ю. Ф. Мухопад. Заявл. 15.12.2008. Опубл. 10.05.2009, БИ № 13.
18. **Мухопад Ю. Ф., Мухопад А. Ю., Пунсык-Намжилов Д. Ц.** Управляющие автоматы мехатроники с новым определением состояний // Тр. II Междунар. науч.-практ. конф. Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. С. 184–190.
19. **Пат. 183109 U1 РФ.** Управляющий автомат /Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов. Заявл. 23.04.2018. Опубл. 11.09.2018, БИ № 26.
20. **А. с. 1547034 СССР.** Устройство для контроля перепрограммируемых блоков постоянной памяти /Ю. Ф. Мухопад, Г. С. Скосырский. Опубл. 28.02.1990, БИ № 8.
21. **Мухопад Ю. Ф., Мухопад А. Ю.** Алгоритмические системы управления. Иркутск: ИрГУПС, 2018. 96 с.
22. **А. с. 991587 СССР.** Формирователь временных интервалов /Ю. Ф. Мухопад, Г. С. Скосырский, Б. Д. Аюшиев и др. Опубл. 23.01.1983, БИ № 3.
23. **Шалыто А. А.** Логическое управление. Методы автоматной и программной реализации алгоритмов. СПб: Наука, 2000. 780 с.
24. **Филатов Д. А., Мухопад Ю. Ф.** Системы управления турбомеханизмами // Сб. Науч. вестн. Новосибирск: НЭТИ, 2013. Вып. 2. С. 17–22.

Поступила в редакцию 27.11.2020

После доработки 27.01.2021

Принята к публикации 18.06.2021
