

УДК519.86:681.3

А. Ю. Мухопад, д-р техн. наук

Ю. Ф. Мухопад, д-р техн. наук

*Кафедра «Автоматизация производственных процессов»,
Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск*

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ

Способы создания программных версий управляющих автоматов существенно зависят от правильности выбора структурных моделей сложных и высокосложных автоматов технических систем реального времени. Предложено использовать новую оригинальную структурную модель автомата, в которой используется логический блок в виде двухходовых элементов «И» с адресацией через подмножество $\{\alpha\}$ логических условий $\alpha_1 \dots \alpha_q$ от дешифратора состояний нового управляющего автомата, независимое от подмножества $\{A\}$ операторов действия $A_1 \dots A_k$. Программная версия представлена в виде последовательности операторов действия и логических условий в форме граф-схемы алгоритма. Реализация граф-схемы алгоритма программной модели на микроконтроллере проста и одинакова для любой степени сложности заданного автомата. Метод создания программной версии был назван структурно-автоматным программированием; он является самым эффективным из известных методов. Программная модель составляется один раз для выбранного типа микроконтроллера, при смене исходного задания потребуется лишь изменить содержание оперативного запоминающего устройства (ОЗУ), хранящего коды переходов, таблицы выбора логических условий и операторов действия.

Автомат, управление, программа, комбинационная схема, оперативное запоминающее устройство, операторные схемы алгоритмов

DOI: 10.20295/2412-9186-2020-6-2-222-233

Введение

При проектировании сложных технических систем разработчики ориентируются на создание программных управляющих подсистем, реализуемых на микроконтроллере. Этому способствует наличие:

- дешевых больших интегральных схем (БИС) микроконтроллеров с различным быстродействием;
- интерфейса с расширенными функциями;
- ОЗУ большого объема [1–4].

Можно выбрать характеристики микроконтроллера, наилучшим образом соответствующие специфике процесса управления. Однако программные подсистемы даже для автоматов средней сложности проигрывают по быстродействию аппаратным средствам в сотни раз [5–8].

Новая методология синтеза и структурная организация управляющих автоматов дает возможность эффективно упрощать программные версии управляющей подсистемы сложных технических систем реального времени.

В работах [9–12] определена методика создания программной версии реализации управляющей граф-схемы алгоритма (ГСА), которая определяется в первую очередь правильностью выбора управляющего автомата.

Существующие программные версии основаны на использовании структурной организации управляющего автомата Мура (УАМ_М) и Мили (УАМ_Л) (рис. 1), [13–17]. Комбинационные схемы их сложны, т. к. при реализации на программируемых логических матрицах (ПЛИМ) системы булевых функций зависят от $n = m + q$ переменных. Здесь m — разрядность кода $y_1...y_m$ состояния $a(t)$, q — количество логических условий $\alpha_1 \dots \alpha_q$ управляющего автомата, ОУ(5) — объект управления, F₁(1) — комбинационная схема переходов, F₂(4) — схема формирования исполнительных управляющих команд, DC(3) — дешифратор, Pг(2),(6),(7),(9) — регистры памяти, БС(10) — блок синхронизации, формирующий импульсы τ_1 и τ_2 длительностью $\tau \ll T$, причем $\tau_1(t) \& \tau_2(t) = \emptyset$, T — длительность одного периода функционирования УАМ_М.

1. Анализ методов создания программной версии

Состояния $a(t)$ в ГСА для УАМ_М размечаются через операторы действия $A_1...A_k$, а для УАМ_Л — через переходы $a(t)$ к $a(t+1)$. При этом каждый переход в УАМ_Л осуществляется только с одним оператором действия. Возможны также

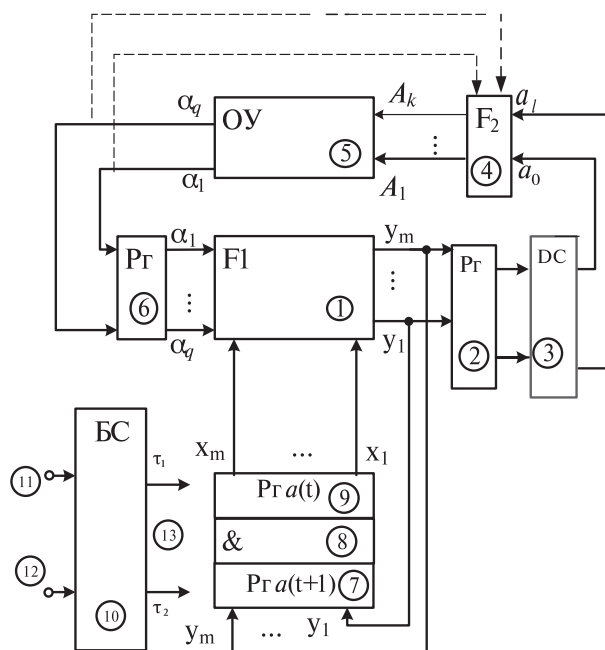


Рис. 1. Структурная организация автомата Мура (УАМ_М) и Мили (УАМ_Л) (пунктирные связи относятся только к УАМ_Л)

Таблица 1. Характеристики управляющих автоматов

№	Тип	m	q	m+q	m+1	V	W	K	m _p	Q
1	СП	3	3	6	4	256	64	1,5	4	4
2	ПА	4	6	10	5	2кб	256	2,0	4	8
3	СА	5	9	14	6	128кб	512	2,3	8	256
4	АС	6	12	18	7	2Мб	1кб	2,6	8	2*10 ³
5	ВС	7	15	22	8	32Мб	2кб	2,7	8	16*10 ³
6	ОС	8	18	26	9	0,5Гб	4кб	2,9	8	12*10 ⁴
7	УС	9	21	30	10	12Гб	12кб	3	12	1*10 ⁶
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

безусловные переходы без проверки логических условий. При реализации схемы переходов $F_1(1)$ на ПЗУ его объем V определяется как $V = m_p 2^{m+q}$, где m_p — реальная разрядность БИС ПЗУ, равная 4, 8. В работе [18] управляющие автоматы разделяются на сверхпростые (СП), простые (ПА), средней сложности (СА), сложные (АС), высокой сложности (ВС), особо сложные (ОС) и ультрасложные (УС). В таблице 1 (столбцы 1–6) приведены характеристики всех типов УАМг.

В последнее десятилетие были предложены варианты управляющих автоматов с новой оригинальной структурной организацией, в которой для каждого периода функционирования (T) по коду состояния $a(t)$ выбирается единственное условие $\alpha_j \in \{\alpha\}$ [9–11, 18]. Новый объем ПЗУ определяется как $W = m_p 2^{m+1}$, а эффективное снижение затрат оборудования для ПЗУ(W) оценивается коэффициентом $Q = V/W = 2^{q-1}$ (столбцы 7–10 табл. 1).

2. Структурная организация программной модели

Наиболее эффективным является новый управляющий автомат Мухопода — НУАМх [10, 12], в структуру которого введен логический блок ЛБ(7) из (q) двухходовых элементов «И» (рис. 2). Адресация элементов «И» для выбора одного $\alpha_j \in \{\alpha\}$ логического условия производится через подмножество $\{\alpha\}$ выходов дешифратора ДС(3), независимое от подмножества $\{A\}$ выбора операторов действия $A_1 \dots A_k$ УА.

На рисунке 2 блок БА(18) определяет условие d принадлежности сигнала на выходе ДС(3) к подмножеству $\{\alpha\}$.

НУАМх в основном режиме работает как УАМ_L с одной схемой $F_1(1)$, а не с двумя, как УАМ_L. При введении в блок синхронизации таймера в виде счетчика Сч(18) и RS-триггера(19), фиксирующего необходимость выдержки времени T , НУАМх без изменения структурной организации работает как УАМг.

Метод проектирования НУАМх по заданной ГСА (рис. 3) сводится к следующему:

— производится разметка состояний по принципиально новому способу. В ГСА отмечаются как начало (входы) операторов $A_1 \dots A_k$, так и входы логических операторов $\alpha_1 \dots \alpha_q$.

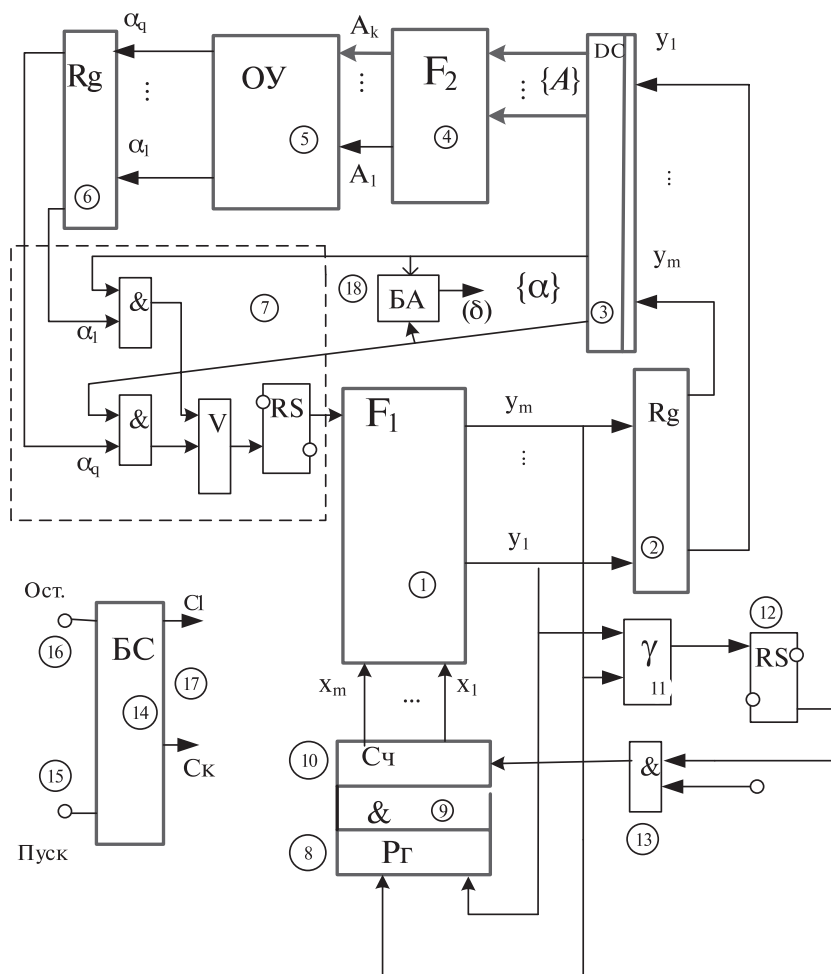


Рис. 2. Новый управляющий автомат Мухопода со счетчиком

Граф переходов НУАМх представлен на рисунке 4, а переходы вне счетчика заданы таблицей 2.

В таблицах 3 и 4 представлены правила выбора логических условий $\alpha_j \in \{\alpha\}$ и операторов действия $A_i \in \{A\}$ по кодам состояний $a(t)$.

Условие (γ) прибавления «1» к содержимому счетчика запишется в виде $\gamma = \alpha(a_0 + \dots + a_{15} + a_{16}) = \alpha(y_5 + y_5 y_4 y_3 y_2 y_1)$. Здесь для реализации переходов по счетчику только при значениях $\alpha_j = 1$ произведена замена переменных: $\alpha_4 = \beta_4$.

3. Реализация программной модели на микроконтроллере

Для аппаратной реализации НУАМх необходимо перейти к функциональному проектированию $F_1(1)$ на ПЛМ. Для создания новой программной версии выполняются следующие действия:

- в ОЗУ размещаются таблицы 2–4 для выбора $A_i \in \{A\}$, $\alpha_j \in \{\alpha\}$ и определения кода $y_1 y_2 \dots y_m$;
- разрабатывается фрагмент программы, реализующей функции дешифратора, логического блока ЛБ(7) и функции вычисления условия γ .

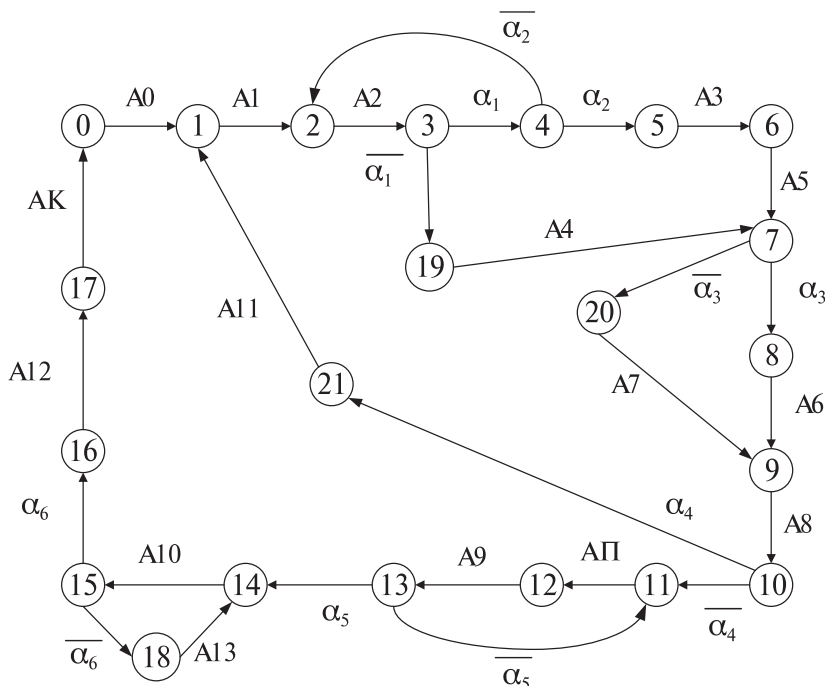


Рис. 4. Граф переходов НУАМх

Таблица 2. Переходы вне счетчика

№	a(t)	N(t)	a	a(t+1)	N(t+1)
1	4	00100	$\overline{\alpha_2}$	2	00010
2	3	00011	$\overline{\alpha_1}$	19	10011
3	19	10011	—	7	00111
4	7	00111	$\overline{\alpha_3}$	20	10100
5	20	10100	—	9	01001
6	10	01010	$\overline{\beta_4}$	21	10101
7	21	10101	—	1	00001
8	13	01101	$\overline{\alpha_5}$	11	01011
9	15	01111	$\overline{\alpha_6}$	18	10010
10	18	10010	—	14	01110
11	17	10001	—	0	00000

Таблица 3. Выбор логических условий

α	1	2	2	4	5	6
a(t)	3	4	7	10	13	15

Таблица 4. Выбор команд управления

A(t)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	A _П	A _К
a(t)	0	1	2	5	19	6	8	20	9	12	14	18	16	11	17

Программной моделью с таблицами 2–4 следует управлять для того, чтобы обеспечить ее функционирование, при этом переходы должны реализовываться как в НУАМх. Для этого разработан алгоритм управления программной моделью, также представленный в виде ГСА. Расшифровка операторов $V_k \in \{V\}$ приведена в таблице 5. Логические операторы определяются следующим образом:

γ — необходимость прибавления «1» к счетчику Сч(10);

δ — выбор операторов $\{A\}$;

T — команды длительностью T выполнены;

E — все переходы реализованы (end).

Алгоритм управления программной моделью также целесообразно реализовать с выбором логических условий по таблице 6.

Таким образом, в целом программная версия управляющего автомата по заданной ГСА представляется в виде двух взаимодействующих программ:

- самой программной модели в виде НУАМх;
- верхнего уровня управления программной моделью, реализованного также в виде программы (рис. 5) для выбранного типа микроконтроллера.

Эта программная версия для выбранного типа микроконтроллера составляется один раз. При смене исходной ГСА необходимо лишь изменить содержимое массива ОЗУ. Предложенный способ создания программной версии управляющего автомата назван структурно-автоматным программированием. Введенный ранее [19], этот метод базировался на использовании более сложной модели автоматов, в которой применялся мультиплексор и схема адресации для выбора одного логического условия. Применение структурно-автоматной модели с вариантом управляющего автомата в виде НУАМх существенно упрощает программную версию.

Таблица 5. Операторы программной модели УА

V	Семантика
1	$\langle 0 \rangle \rightarrow \text{Сч}(10), \text{Pг}(6), \text{RS}(12)$
2	Считывание $F_1(1)$
3	$\text{И}(13) \text{ — } +1 \text{ к Сч}(10)$
4	Опрос DC(3)
5	$\langle 1 \rangle \rightarrow \text{RS}(19)$
6	Включение таймера
7	Опрос схемы окончания T
8	+1 к Сч(T)
9	$A_i \in \{A\}$ Опрос схемы E (end)
10	$\langle \text{Pг}(8) \rangle \rightarrow \text{Сч}(10)$
11	Работа завершена

Таблица 6. Выбор логических условий для управления программной моделью

α	γ	δ	T	E
a(t)	2	4	5	10

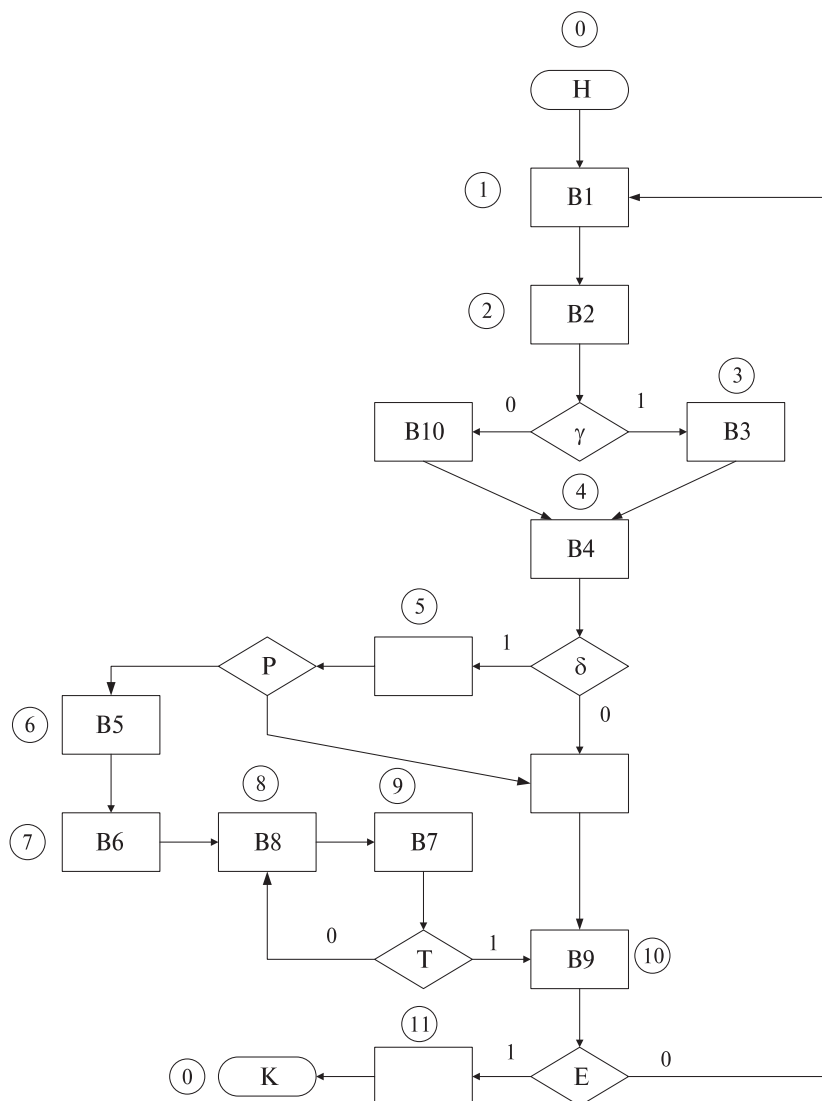


Рис. 5. Алгоритм управления программной моделью

Особо отметим: чем сложнее заданная ГСА для $УАМ_r$ и $УАМ_L$ тем больше команд в программе, реализующей автоматную версию. Но для структурно-автоматного программирования это не так, поскольку программная модель НУАМх не зависит от степени сложности управляющего автомата, а комплекс двух взаимодействующих программных автоматов весьма прост и не требует большого количества команд микроконтроллера. Поэтому листинг всей программы не приводится.

Заключение

В статье развит метод структурно-автоматного программирования, основанный на создании программной версии управляющих автоматов нового типа с оригинальной структурной организацией. В их структуру введен логический блок из (q) двухвходовых элементов «И», адресация которых для выбора одного

логического условия α_j из множества $\alpha_1 \dots \alpha_q$ осуществляется подмножеством $\{\alpha\}$ выходов дешифратора состояний, независимым от подмножества $\{A\}$ выбора операторов действия $A_1 \dots A_k$. Задание для создания программной версии представлено в виде граф-схемы алгоритма, реализация которого по структуре нового управляющего автомата не зависит от степени сложности ГСА. Этот метод наиболее эффективен для программной реализации высокосложных и особо сложных автоматов.

Библиографический список

1. Новиков Д. А. Кибернетика / Д. А. Новиков // Проблемы управления. — 2016. — № 1. — С. 73–81.
2. Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications / Ed. by X.-Sh. Yang et al. — Amsterdam, Boston: Elsevier, 2013. — 450 p.
3. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2010. — 760 с.
4. Woods R. E. Digital image processing: 2nd Ed. / R. E. Woods, R. C. Gonzales. — NJ: Prentice Hall, 2002. — 813 p.
5. Поликарпова Н. Автоматное программирование / Н. Поликарпова, А. А. Шалыто. — СПб.: Питер, 2009. — 176 с.
6. Харрис Д. М. Цифровая схемотехника и архитектура компьютера / М. Д. Харрис, С. Л. Харрис. — М.: ДМК Пресс, 2018. — 356 с.
7. Соловьев В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе ПЛИС / В. В. Соловьев, А. Климович. — М.: Телеком, 2008. — 374 с.
8. Труды по теории синтеза и диагноза конечных автоматов и релейных устройств / под ред. В. В. Сапожникова, Вл. В. Сапожникова. — СПб.: Эл-мор, 2009. — 894 с.
9. Мухопад Ю. Ф. Структура управляющих автоматов технических систем железнодорожной автоматики / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов // Автоматика на транспорте. — СПб.: ПГУПС, 2018. — Т. 4, № 1. — С. 88–105.
10. Мухопад Ю. Ф. Структурная организация управляющих автоматов нового типа для технических систем железнодорожной автоматики / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов // Автоматика на транспорте. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Т. 5, № 2. — С. 244–255.
11. Патент на полезную модель № 183109. Российская Федерация, G06F 9/00, G05F 9/00. Управляющий автомат № 2018115113. — Заявл. 23.04.2018; опублик. 11.09.2018. — Бюл. № 26.
12. Патент на полезную модель № 191742. Российская Федерация, G06F 9/00. Управляющий автомат с мажоритарно-резервируемой комбинационной схемой: № 2019104150 / Ю. Ф. Мухопад, А. Ю. Мухопад, Д. Ц. Пунсык-Намжилов. — Заявл. 14.02.2019; опублик. 19.08.2019. — Бюл. № 23.
13. Ульман Д. Д. Введение в теорию автоматов, языков и вычислений / Д. Д. Ульман, Р. Мотвани, Д. Хопкрофт. — М.: Вильямс, 2016. — 528 с.
14. Максфилд К. Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы / К. Максфилд. — М.: ДМК Пресс, 2015. — 407 с.
15. Баркалов А. А. Прикладная теория цифровых автоматов / А. А. Баркалов, Л. А. Титаренко. — Донецк: ДонНТУ, 2013. — 320 с.

16. Горбатов В. А. Теория автоматов / В. А. Горбатов, А. В. Горбатов, М. В. Горбатова. — М.: Астрель, 2008. — 699 с.
17. Кудрявцев В. Б. Теория автоматов / В. Б. Кудрявцев, Ф. Б. Алешин, А. С. Подколзин // МГУ им. Ломоносова. — М.: Юрайт, 2018. — 320 с.
18. Мухопад А. Ю. Теория управляющих автоматов технических систем реального времени / А. Ю. Мухопад. — Новосибирск: Наука, 2015. — 176 с.
19. Мухопад А. Ю. Структурно-автоматное программирование / А. Ю. Мухопад // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов: сб. науч. ст. VI международной научно-практической конференции. — Барнаул, 2016. — С. 43–48.

A. Yu. Mukhopad

Yu. F. Mukhopad

*Chair of "Computer-Aided Manufacturing",
Irkutsk State Railway Transport University, Irkutsk*

PROGRAM IMPLEMENTATION OF COMPLICATED CONTROL AUTOMATA

Design methods for software versions of control automata essentially depend on verification of structural models of complicated and highly complicated automata for real-time engineering systems. It is suggested to use a new original structural model of an automaton, where a logical block organized as two-input elements "1" is used addressing via subset of $\{\alpha\}$ logical conditions $\alpha_1 \dots \alpha_q$ from a decoder of conditions of a new control automaton independent of subset $\{A\}$ action statements $A_1 \dots A_k$. The software version is presented in the form of sequence of operators as well as logical conditions in the form of a flowgraph. Implementation of the flowgraph for a software model on a microcontroller is simple and identical for any degree of complexity of the given. The design method of the software version in question was termed as structural automata-based programming; the latter being one of the most efficient methods on record. The software model is compiled once from the selected type of microcontrollers. In case of the initial operation change it is required only to alternate the meaning of the working storage (OZU), which holds jump codes, pick tables for logical conditions and action statements.

Automaton, control, program, combinational circuit, working storage, operator algorithmic schemes

References

1. Novikov D. A. (2016) Kibernetika [Cybernetics]. *Problemy upravleniya [Control issues]*, no. 1, pp. 73–81. (In Russian)
2. (2013) Swarm intelligence and bio-inspired computation: theory and applications. Ed. by X.-Sh. Yang et al. Amsterdam, Boston, Elsevier, 450 p.
3. Ugryumov E. P. (2010) Tsyfrovaya skhemotekhnika [Digital circuit engineering]. Saint Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 760 p. (In Russian)
4. Woods R. E. & Gonzales R. C. (2002) Digital image processing: 2nd Ed. New Jersey, Prentice Hall Publ., 813 p.
5. Polikarpova N. & Shalyto A. A. (2009) Avtomatnoye programmirovaniye [Automata-based programming]. Saint Petersburg, Peter Publ., 176 p. (In Russian)

6. Harris D. M. & Harris S. L. (2018) *Tsifrovaya skhemotekhnika i arkhitektura kompyutera* [Digital Design and Computer Architecture]. Moscow, DMK Press, 356 p. (In Russian)
7. Solovyev V. V. & Klimovich A. (2008) *Logicheskoye proektirovaniye tsifrovyykh system na osnove PLIS* [Logical design of digital systems based on FPGA]. Moscow, Telecom Publ., 374 p. (In Russian)
8. (2009) *Trudy po teorii sinteza i diagnoza konechnyykh avtomatov i releinykh ustroystv* [Proceedings on the theory of synthesis and diagnostics of finite automata and relay devices]. Ed. by V. V. Sapozhnikov, Vl. V. Sapozhnikov. Saint Petersburg, El-mor Publ., 894 p. (In Russian)
9. *Mukhopad Yu. F., Mukhopad A. Yu. & Punsyk-Namzhirov D. Ts.* (2018) *Struktura upravlyayushchikh avtomatov tekhnicheskikh system zheleznodorozhnoy avtomatiki* [Arrangement of control automata for railway automation engineering systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., vol. 4, no. 1, pp. 88–105. (In Russian)
10. *Mukhopad Yu. F., Mukhopad A. Yu. & Punsyk-Namzhirov D. Ts.* (2019) *Strukturnaya organizatsiya upravlyayushchikh avtomatov novogo tipa dlya tekhnicheskikh system zheleznodorozhnoy avtomatiki* [Structural organization of the new-type control automata for railway automation engineering systems]. *Avtomatika na transporte* [Transport automation]. Saint Petersburg, PGUPS [St. Petersburg State Transport University] Publ., vol. 5, no. 2, pp. 244–255. (In Russian)
11. (2018) Patent na poleznuyu model no. 183109. Rossiyskaya Federatsiya, G06F 9/00, G05F 9/00. *Upravlyayushchiy avtomat no. 2018115113*. [Useful model patent no. 183109. Russian Federation, G06F 9/00, G05F 9/00. Control automaton no. 2018115113]. Application April 23rd, 2018, published September 11th, 2018. Bulletin no. 26. (In Russian)
12. (2019) Patent na poleznuyu model no. 191742. Rossiyskaya Federatsiya, G06F 9/00. *Upravlyayushchiy avtomat s mazhoritarno-rezerviruemyy kombinatsionnoy skhemoy: no. 2019104150* [Useful model patent no. 191742. Russian Federation, G06F 9/00. Control automaton with majority-reserved combinational circuit: no. 2019104150]. Yu. F. Mukhopad, A. Yu. Mukhopad, D. Ts. Punsyk-Namzhirov. Application February 14th, 2019, published August 19th, 2019. Bulletin no. 23. (In Russian)
13. Ullman J. D., Motwani R. & Hopcroft J. E. (2016) *Vvedeniye v teoriyu avtomatov, yazykov i vychisleniy* [Introduction to Automata, Languages and Computation]. Moscow, Williams Publ., 528 p. (In Russian)
14. *Maxfield C.* (2015) *Proektirovaniye na PLIS. Arkhitektura, sredstva i metody* [FPGA design. Architecture, facilities and methods]. Moscow, DMK Press, 407 p. (In Russian)
15. *Barkalov A. A. & Titarenko L. A.* (2013) *Prikladnaya teoriya stifrovyykh avtomatov* [Applied theory of digital automata]. Donetsk, DonNTU [Donetsk National Technical University] Publ., 320 p. (In Russian)
16. *Gorbatov V. A., Gorbatov A. V. & Gorbatova M. V.* (2008) *Teoriya avtomatov* [Theory of automata]. Moscow, Astrel Publ., 699 p. (In Russian)
17. *Kudryavtsev V. B., Aleshin F. B. & Podkolzin A. S.* (2018) *Teoriya avtomatov* [Theory of automata]. MGU im. Lomonosova [Lomonosov Moscow State University]. Moscow, Urait Publ., 320 p. (In Russian)
18. *Mukhopad A. Yu.* (2015) *Teoriya upravlyayushchikh avtomatov tekhnicheskikh system realnogo vremeni* [Theory of control automata for real-time engineering systems]. Novosibirsk, Nauka [Science] Publ., 176 p. (In Russian)

19. *Mukhopad A. Yu.* (2016) Strukturno-avtomatnoye programmirovaniye. Mnogoyaderniye protsessory, parallelnoye programmirovaniye, PLIS, sistemy obrabotky signalov [Structural automata-based programming. Multi-core processors, concurrent programming, FPGA, signal processing systems]. Collection of academic papers of the 6th International Research and Training Conference. Barnaul, pp. 43–48. (In Russian)

*Статья представлена к публикации членом редколлегии Вал. В. Сапожниковым
Поступила в редакцию 16.02.2020, принята к публикации 10.03.2020*

МУХОПАД Александр Юрьевич — доктор технических наук, доцент Иркутского государственного университета путей сообщения
e-mail: jcmg@mail.ru

МУХОПАД Юрий Федорович — доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор Иркутского государственного университета путей сообщения
e-mail: bts48@mail.ru

© Мухопад А. Ю., Мухопад Ю. Ф., 2020