

## АВТОМАТНЫЙ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ

В. В. МИХАЙЛОВ<sup>1</sup>, Н. М. ИВАНОВ<sup>2</sup>, Д. В. КУЗЬМИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук,  
199178, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: mwwcari@gmail.com

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
190000, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: inm41.ivanov@yandex.ru

Представлен автоматный компонент системы управления перемещением шестиногого робота. Построены гибридные автоматы управления перемещением стоп и смены фаз движения отдельных конечностей. Представлены матрицы основных типов статически устойчивой походки робота. Разработаны автоматы походки, координирующие работу гибридных автоматов конечностей для обеспечения дискретного режима походки с последовательной сменой фаз их движения и непрерывного — с совмещением фаз перемещения корпуса и переноса холостой группы конечностей. Конкретным объектом управления и моделирования является инсектоморфная шагающая машина, разрабатываемая в ГУАП-АО „Арсенал-07“.

**Ключевые слова:** шагающая машина, походка, фазы движения конечности, матрица походки, гибридный автомат

**Введение.** Шагающие средства передвижения обладают преимуществами перед колесными или гусеничными ввиду дискретной колеи и экологичности, возможности движения по бездорожью, преодолению препятствий, перед которыми бессильны другие виды транспорта, а также возможности использовать общие с человеком транспортные среды [1—3]. Разработка математических моделей и действующих макетов шагающих роботов началась более 50 лет назад [4—6]. Однако условия для создания реальных конкурентоспособных машин такого рода сложились лишь сейчас в связи с потребностями космической отрасли, работ на морском дне, мониторинга энергосетей и нефтегазовых трубопроводов, а также в результате развития информационных и машиностроительных технологий [7—9]. Значительное внимание уделяется разработкам статически устойчивых конструкций с шестью и более ногами [9—12].

Система управления шагающей машиной содержит глобальный, локальный и местный уровни управления [1, 13]. Задачи локального уровня — выработка сигналов управления приводами звеньев конечностей, координация движения конечностей и построение походки с учетом устойчивости машины и заданных на глобальном уровне установок. Представленная работа посвящена вопросам построения автоматного компонента системы управления движением машины на локальном уровне, в том числе разработке автоматов переключения фаз движения отдельных конечностей и автоматов походки, координирующих работу автоматов конечностей при построении заданного типа походки. По своей природе система управления перемещением конечности является гибридной. Дискретные процедуры смены фаз движения конечностей и координации движения групп ног при построении походки сочетаются здесь с непрерывным процессом перемещения ног по заданным траекториям. По этой причине в качестве базового математического инструмента системы управления выбран формализм гибридного автомата [14].

Настоящая работа является продолжением исследований по построению и моделированию системы управления инсектоморфной шагающей машиной, разрабатываемой в ГУАП-АО „Арсенал-7“ [13, 15, 16].

**Гибридный автомат управления движением конечности.** По [14], состояниям гибридного автомата приписываются некоторые непрерывные действия, которые выполняются, пока состояние является текущим и включено продвижение локального времени. Переход в новое состояние происходит, как только предикат, связанный с этим переходом, принимает значение *true*. При этом останавливается локальное время, прекращается выполнение непрерывного действия, переменные сохраняют вычисленное значение, и выполняется мгновенное действие, соответствующее выходному сигналу на данном переходе. Автомат переходит в новое состояние, снова продвигается непрерывное время (если продвижение не запрещено выходным сигналом на переходе) и выполняется непрерывное отображение с использованием в качестве начальных запомненных значений переменных. Граф гибридного автомата управления сменой фаз движения конечности показан на рис. 1.

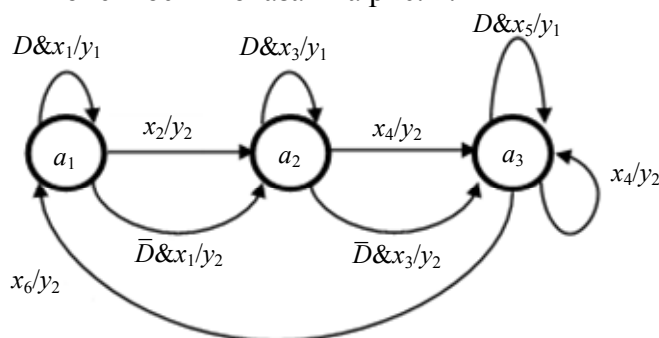


Рис. 1

Состояния автомата:  $a_1$  — подъем—перенос стопы,  $a_2$  — опускание стопы,  $a_3$  — рабочее движение. Непрерывные действия, приписанные состояниям — перемещение стопы конечности по заданным траекториям [13]. Входные сигналы автомата:  $x_1$  — достигнута точка зависания,  $x_2$  — опустить стопу,  $x_3$  — произошло касание стопы,  $x_4$  — начать рабочее движение,  $x_5$  — прекратить рабочее движение,  $x_6$  — выполнить перенос стопы в точку зависания. Сигналы  $x_1, x_3, x_5$  — локальные,  $x_1$  и  $x_5$  генерируются в блоке управления движением стопы по заданной траектории (непрерывный компонент гибридного автомата),  $x_3$  — сигнал от датчика касания стопы. Сигналы  $x_2, x_4, x_6$  — глобальные, генерируются автоматом походки.  $D$  — глобальный внешний сигнал, определяющий режим походки:  $D=1$  — дискретная,  $D=0$  — непрерывная.

Характер продвижения локального времени определяется значением выходных сигналов автомата:  $y_1, y_3, y_5$  запрещают запуск локального времени в состоянии перехода;  $y_2, y_4, y_6$  разрешают. Остановка рабочего перемещения стопы в состоянии  $a_3$  и его возобновление по сигналу  $x_4$  связаны с тем, что в вариантах походки 4—2 и 5—1 каждая конечность участвует в нескольких последовательных перемещениях корпуса. Лишь на последнем шаге граница допустимого интервала перемещения стопы будет достигнута и автомат, управляющий движением конечности, может быть переведен в новое состояние.

В случае непрерывной походки ( $D=0$ ) переход автомата из  $a_1$  в состояние  $a_2$  происходит по локальному сигналу „точка зависания достигнута“. При этом останавливается локальное время, иницируется отображение, соответствующее состоянию  $a_2$ , и вновь запускается локальное время для движения по новой траектории. Аналогично происходит переход из  $a_2$  в  $a_3$  по локальному сигналу „касание стопы с поверхностью“. Переход из  $a_3$  в  $a_1$  происходит по глобальному сигналу  $x_6$  „выполнить перенос стопы в точку зависания“, который подается одновременно на группу конечностей, выполняющих рабочее движение, и координирует работу ног машины.

Непрерывные отображения, приписанные состояниям автомата — это функции, определяющие перемещение стопы по заданным траекториям, генерируемые в непрерывном компоненте локальной системы управления робота [13, 15].

**Автомат управления походкой шагающей машины**

*Матрицы походки.* Матрицы дискретной походки типов 3—3 и 4—2 показаны на рис. 2 (строки матриц соответствуют номерам конечностей машины, столбцы — фазам движения конечностей. Фазы движения: П — подъем—перенос стопы в точку зависания, О — опускающие стопы, Д — рабочее движение, Н — стопа неподвижна).

П	Н	О	Н	Д	Н
Н	Д	Н	П	Н	О
П	Н	О	Н	Д	Н
Н	Д	Н	П	Н	О
П	Н	О	Н	Д	Н
Н	Д	Н	П	Н	О

П	Н	О	Н	Д	Н	Н	Д	Н
Н	Д	Н	П	Н	О	Н	Д	Н
Н	Д	Н	Н	Д	Н	П	Н	О
П	Н	О	Н	Д	Н	Н	Д	Н
Н	Д	Н	П	Н	О	П	Н	Н
Н	Д	Н	Н	Д	Н	Н	Д	О

Рис. 2

Для походки 3—3 первый столбец матрицы соответствует неподвижному положению машины с опорой на конечности 2, 4, 6. Конечности 1, 3, 5 выполняют холостой перенос в фиксированную точку траектории. Второй столбец — перемещение корпуса на опорной тройке конечностей, конечности холостой тройки относительно корпуса машины неподвижны. Третий столбец — шаг завершен, машина стоит с опорой на конечности 2, 4, 6. Стопы холостой тройки 1, 3, 5 опускаются до касания с поверхностью и становятся опорными. Фазы движения повторяются при смене рабочей и холостой групп ног. Число синхронно работающих групп ног равно двум, цикл движения содержит два шага, включающих шесть последовательно выполняемых фаз движения.

Для походки 4—2 число синхронно работающих групп ног равно трем, цикл содержит три шага, включающих девять последовательно выполняемых фаз. Для походки 5—1 число групп и шагов в цикле равно шести, число фаз движения возрастает до восемнадцати.

Матрицы непрерывной походки показаны на рис. 3 (а — 3—3, б — 4—2, в — 5—1. ПО — фаза холостого переноса, Д — фаза рабочего движения конечности). Для походки 3—3 первый столбец матрицы соответствует подъему—переносу тройки конечностей 1, 3, 5 и рабочему движению второй тройки 2, 4, 6. Второй столбец — рабочему движению группы ног 1, 3, 5 и переносу тройки 2, 4, 6. В походке 4—2 на каждом шаге корпуса выполняется подъем—перенос одной пары ног (1—4, 2—5 или 3—6). Рабочее движение одновременно выполняют две другие пары ног — одна уже участвовавшая в рабочем движении, вторая — закончившая перенос. В походке 5—1 на каждом шаге переносится одна нога, рабочее движение выполняется на пяти других.

ПО	Д
Д	ПО
ПО	Д
Д	ПО
ПО	Д
Д	ПО

ПО	Д	Д
Д	ПО	Д
Д	Д	ПО
ПО	Д	Д
Д	ПО	Д
Д	Д	ПО

ПО	Д	Д	Д	Д	Д
Д	ПО	Д	Д	Д	Д
Д	Д	ПО	Д	Д	Д
Д	Д	Д	ПО	Д	Д
Д	Д	Д	Д	ПО	Д
Д	Д	Д	Д	Д	ПО

Рис. 3

Процедуры холостого переноса и включения рабочей фазы движения выполняются для каждой конечности независимо под контролем собственных автоматов управления. Координацию осуществляет автомат походки, который синхронно прекращает фазу рабочего движения одной из групп ног, когда все конечности холостой группы коснутся поверхности.

Матрица походки полностью определяет состав состояний и структуру переходов автомата походки. В каждом состоянии автомата все конечности выполняют те непрерывные действия, которые указаны в столбце матрицы.

Тип и источник входного сигнала, тип и получатель выходного сигнала определяются фазами движения конечностей, указанными в соответствующем столбце, и логикой формирования сигналов.

*Автоматы походки.* Графы автоматов управления походкой 3—3 и 4—2 показаны на рис. 4 и 5 соответственно. Переключение режимов походки выполняется с помощью внешнего управляющего сигнала  $D$ . Как видно из рисунков, автомат походки состоит из однотипных структурных элементов — первичных автоматов, которые управляют движением групп конечностей при рабочем перемещении корпуса с опорой на ту или иную группу ног. Для походки 3—3 автомат содержит два первичных автомата с состояниями  $A_1, A_2, A_3$  и  $A_4, A_5, A_6$  для управления двумя тройками ног. Для походки 4—2 число первичных автоматов равно трем, для походки 5—1 — шести.

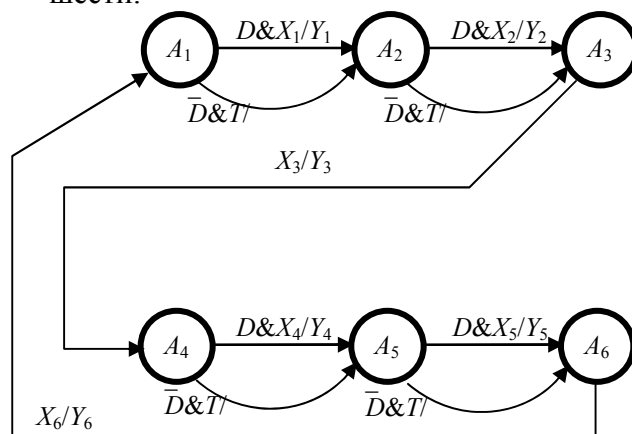


Рис. 4

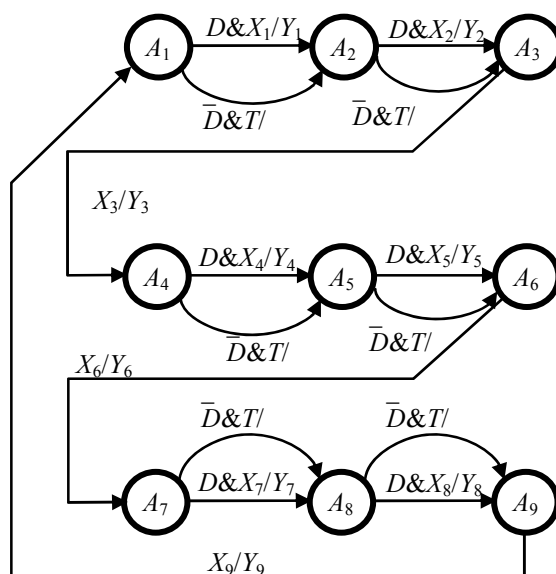


Рис. 5

*Работа автомата в режиме дискретной походки.* Состояния автомата  $A_1$  и  $A_4$  соответствуют переносу стоп ног в точку зависания,  $A_2$  и  $A_5$  — выполнению рабочего движения,  $A_3$  и

$A_6$  — опусканию стоп. Входные сигналы:  $X_1, X_4$  — выполнить опускание стоп,  $X_2, X_5$  — выполнить перенос стоп в точку зависания,  $X_3, X_6$  — выполнить рабочее движение. Все — для первой и второй тройки конечностей соответственно.

Входные сигналы формируются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1 &= U_1 \& U_3 \& U_5, X_2 = W_2 \vee W_4 \vee W_6, X_3 = C_1 \& C_3 \& C_5; \\ X_4 &= U_2 \& U_4 \& U_6, X_5 = W_1 \vee W_3 \vee W_5, X_6 = C_2 \& C_4 \& C_6, \end{aligned}$$

где  $U_i$  — сигнал достижения точки зависания,  $W_i$  — сигнал завершения рабочего движения,  $C_i$  — сигнал касания стопы с поверхностью,  $i$  — номер конечности. Сигналы  $U_i$  и  $W_i$  поступают с блоков управления движением конечностей,  $C_i$  — с тактильных датчиков..

Выходные сигналы автомата:  $Y_1, Y_4$  — выполнить рабочее движение второй и первой тройками ног,  $Y_2, Y_5$  — опустить стопы ног первой и второй троек.  $Y_3, Y_6$  — выполнить перенос в точку зависания стоп ног второй и первой троек. Эти сигналы являются глобальными входными для гибридных автоматов управления движением конечностей.

Граф автомата управления походкой 4—2 показан на рис. 5. Автомат имеет девять состояний и работает с тремя группами ног. Первая — конечности 1 и 4, вторая — 2 и 5, третья — 3 и 6. Состояния автомата:  $A_1, A_4, A_7$  — перенос первой, второй и третьей групп ног в точку зависания,  $A_2, A_5, A_7$  — рабочее движение групп ног 2—3, 1—3, 1—2,  $A_3, A_6, A_9$  — опускание конечностей всех трех групп.

Формулы для определения входных сигналов автомата походки имеют вид:

$$\begin{aligned} X_1 &= U_1 \& U_4, X_2 = W_2 \vee W_3 \vee W_5 \vee W_6, X_3 = C_3 \& C_6; \\ X_4 &= U_2 \& U_5, X_5 = W_1 \vee W_3 \vee W_4 \vee W_6, X_6 = C_1 \& C_4; \\ X_7 &= U_3 \& U_6, X_8 = W_1 \vee W_4 \vee W_2 \vee W_5, X_9 = C_2 \& C_5. \end{aligned}$$

Выходные сигналы автомата:  $Y_1, Y_4, Y_7$  — выполнить рабочее движение группами 2—3, 1—3, 1—2;  $Y_2, Y_5, Y_8$  — опустить стопы ног групп 1, 2, 3;  $Y_3, Y_6, Y_9$  — выполнить перенос ног групп 1, 2, 3. Эти сигналы являются глобальными входными для автоматов управления движением конечностей.

Аналогично строится автомат походки 5—1.

*Работа автомата в режиме непрерывной походки.* В соответствии с числом столбцов матрицы походки (рис. 3) автомат должен содержать два состояния, которые фиксируют опускание первой или второй группы конечностей и задают сигнал подъема рабочей группы конечностей, когда все конечности холостой группы коснутся поверхности. Для компактности схемной реализации системы управления в случае непрерывной и дискретной походки использован один и тот же автомат с имитацией сокращения числа состояний путем „проскакивания“ первых двух состояний в каждом структурном компоненте. Переходы из этих состояний происходят по тактовому сигналу  $T$  без формирования выходных сигналов. Выбор пути перехода задается сигналом  $D$ . Переход из состояний  $A_3$  (или  $A_6$ ) происходит по сигналам  $X_3$  (или  $X_6$ ), которые определяются по формулам:

$$X_3 = C_1 \& C_3 \& C_5, X_6 = C_2 \& C_4 \& C_6.$$

Выходные сигналы:  $Y_3$  — начать холостой перенос второй тройки ног,  $Y_6$  — начать холостой перенос первой тройки ног. Сигналы являются глобальными входными для автоматов управления движением конечностей.

Аналогичным образом построен граф переходов-выходов автомата управления походкой 4—2 (рис. 5).

*Нерегулярная походка шагающей машины.* В случае регулярной походки ( $R=1$ ) связи первичных автоматов между собой (рис. 4, 5) определяют последовательность их работы. При нерегулярной походке связи между первичными автоматами должны быть разорваны ( $R=0$ ), а инициация той или иной структуры должна задаваться внешними управляющими сигналами с верхней системы управления машиной (на рис. 6 представлен фрагмент графа

управления нерегулярной походки 5—1). Автомат походки будет работать в режиме внешнего управления с сохранением остальных функций.

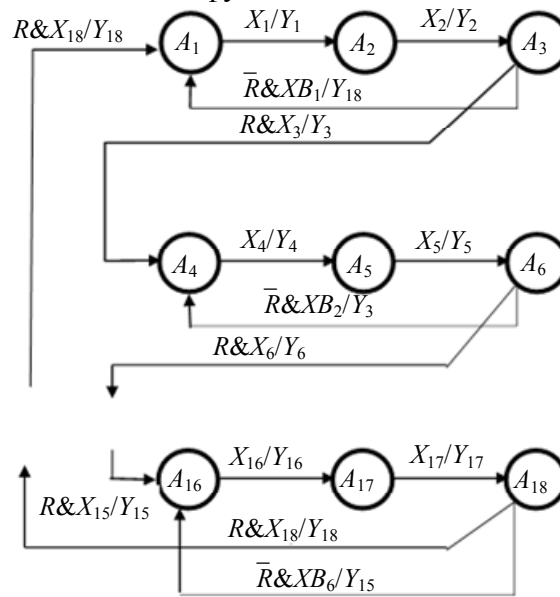


Рис. 6

**Заключение.** В заключение кратко коснемся вопросов структурной реализации автомата походки, детальное обсуждение которого выходит за рамки статьи. Разработанная композиция автоматов походки является классической. Более надежный и гибкий вариант реализации автомата — по принципу динамической автоматной сети [17]. В первичный автомат сети (рис. 4 или 5) помимо функций переходов-выходов входит коммутационная матрица, которая определяет связи данного автомата с первичными автоматами походки и автоматами конечностей для всех вариантов походки. Динамическая автоматная сеть может быть построена по принципу пространственной конфигурации. В этом случае она должна содержать шесть первичных автоматов — необходимое число для реализации всех типов походки. Сеть может быть построена по принципу временной конфигурации с использованием одного первичного автомата, который последовательно выполняет действия, приписанные другим первичным автоматам (рис. 5, 6).

Исследования выполнены в рамках бюджетной темы № 0073–2019–0004.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лапшин В. В. Механика и управление движением шагающих машин. М.: Изд-во МГТУ им Н.Э.Баумана, 2012. 199 с.
2. Брискин Е. С., Чернышев В. В., Малолетов А. В., Шаронов Н. Г. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин // Робототехника и техническая кибернетика. 2013. № 1. С. 6—14.
3. Игнатъев М. Б., Владимиров С. В., Сапожников В. И., Сергеев М. Б., Кузьмин Д. В., Соловьев Н. В., Рыжов А. В., Липинская Я. А. Шагающие роботы — проблемы и перспективы // Инноватика и экспертиза. 2016. Вып. 2 (17). С. 128—137.
4. Охоцимский Д. Е., Голубев Ю. Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. М.: Наука, 1984. 310 с.
5. Vukobratović M. Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanisms. Mihailo Pupin Institute, 1975. 541 p.
6. Ignatev M. B., Kulakov F. M., Mikhailov V. V., Jurevitch E. I. Control Algorithms of Adaptive Walking Machine // Proc. of the 4th Symp. on Autom. Contr. in Space. Dubrovnik, September 6—10, 1971. Beograd, 1971.
7. Чернышев В. В., Араканцев В. В. Подводный шагающий робот МАК-1 // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. „Экстремальная робототехника“. СПб: Политехника-сервис, 2016. С. 245—250.

8. Шурьгин В. А., Серов В. А., Ковинов Н. В., Устинов С. А. Обустройство и обеспечение эксплуатации подводных месторождений углеводородов арктического шельфа с использованием роботизированных шагающих платформ // Тр. междунар. науч.-техн. конф. „Экстремальная робототехника“. СПб: Политехника-сервис, 2018. С. 530—540.
9. Гаврилов А. Е., Леонард А. В., Мишустин О. А., Селюнин Д. М., Хантимирова С. Б. Универсальная шагающая инсектоморфная платформа // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. „Экстремальная робототехника“. СПб: Политехника-сервис, 2017. С. 352—357.
10. Xilun Ding, Zhiying Wang, Rovetta A., Zhu J. M. Locomotion analysis of hexapod robot // Climbing and Walking Robots. 2010. P. 291—309 [Электронный ресурс]: <<http://www.intechopen.com/books/climbingand-walking-robots>>.
11. Yilin Xu, Feng Gao, Yang Pan, Xun Chai. Hexapod Adaptive Gait Inspired by Human Behavior for Six-Legged Robot without Force Sensor // J. Intell. Robot Syst. 2017. Vol. 88. P. 19—35. DOI 10.1007/s10846-017-0532-7.
12. Nan Hu, Shaoyuan Li, Yuxuan Zhu, Feng Gao. Constrained Model Predictive Control for a Hexapod Robot Walking on Irregular Terrain // J. of Intelligent & Robotic Systems. 2019. Vol. 94. P. 179—201. DOI 10.1007/s10846-018-0827-3
13. Михайлов В. В., Соловьева Т. Н., Кузьмин Д. В. Моделирование перемещения шагающего робота по неровной поверхности // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XVIII Междунар. конф. Самара, 20—25 сентября 2016. Самара: Офорт, 2017. С. 421—429.
14. Колесов Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. 238 с.
15. Михайлов В. В., Соловьева Т. Н., Попов В. П. Моделирование кинематики шагающего робота // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 34—40.
16. Михайлов В. В., Иванов Н. М. Управление походкой шагающего робота на основе гибридного автомата // Тр. XIX Междунар. конф. „Проблемы управления и моделирования в сложных системах“. Самара, 12—15 сентября 2017. Самара: ОФОРТ, 2017. С. 178—185.
17. Торгашев В. А. Динамические автоматные сети // Тр. СПИИРАН. 2013. Вып. 4(27). С. 23—34.

**Сведения об авторах**

- Владимир Валентинович Михайлов** — д-р техн. наук, профессор; СПб ФИЦ РАН, лаборатория интеллектуальных технологий в системном анализе и моделировании; вед. научный сотрудник; E-mail: mwwcari@gmail.com
- Николай Михайлович Иванов** — канд. техн. наук; СПб ГУАП, кафедра вычислительных систем и сетей; доцент; E-mail: inm41@yandex.ru
- Дмитрий Юрьевич Кузьмин** — аспирант; СПб ФИЦ РАН; E-mail: dimazik999666@yandex.ru

Поступила в редакцию  
02.10.2020 г.

**Ссылка для цитирования:** Михайлов В. В., Иванов Н. М., Кузьмин Д. В. Автоматный компонент системы управления движением шагающей машины // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 12. С. 1073—1080.

**AUTOMATIC COMPONENT OF A WALKING MACHINE MOTION CONTROL SYSTEM**

**V. V. Mikhailov<sup>1</sup>, N. M. Ivanov<sup>2</sup>, D. V. Kuzmin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the RAS,  
199178, St. Petersburg, Russia  
E-mail: mwwcari@gmail.com

<sup>2</sup> St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
190000, St. Petersburg, Russia  
E-mail: inm41.ivanov@yandex.ru

An automaton component of the motion control system for a six-legged robot is presented. Hybrid automata for controlling the movement of feet and changing the phases of movement of individual limbs have been constructed. Matrices of the main types of statically stable gait of a robot are presented. Gait automata have been developed that coordinate the operation of hybrid limb automatons to provide a

discrete gait mode with a sequential change in the phases of their movement and with continuous combination of the phases of movement of the body and transfer of an idle group of limbs. The specific object of control and modeling is an insectomorphic walking machine being developed at SUAI-JSC "Arsenal-07".

**Keywords:** walking machine, gait, phases of limb movement, gait matrix, hybrid automaton

#### REFERENCES

1. Lapshin V.V. *Mekhanika i upravleniye dvizheniyem shagayushchikh mashin* (Mechanics and Motion Control of Walking Machines), Moscow, 2012, 199 p. (in Russ.)
2. Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V., Sharonov N.G. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika* (Robotics and Technical Cybernetics), 2013, no. 1, pp. 6–14. (in Russ.)
3. Ignat'yev M.B., Vladimirov S.V., Sapozhnikov V.I., Sergeyev M.B., Kuz'min D.V., Solov'yev N.V., Ryzhov A.V., Lipinskaya Ya.A. *Innovatika i ekspertiza*, 2016, no. 2(17), pp. 128–137. (in Russ.)
4. Okhotsimsky D.E., Golubev Yu.F. *Mekhanika i upravleniye dvizheniyem avtomaticheskogo shagayushchego apparata* (Mechanics and Motion Control of an Automatic Walking Apparatus), Moscow, 1984, 310 p. (in Russ.)
5. Vukobratović M. *Legged Locomotion Robots and Anthropomorphic Mechanisms*, Mihailo Pupin Institute, 1975, 541 p.
6. Ignatev M.B., Kulakov F.M., Mikhailov V.V., Jurevitch E.I. Proc. of the 4th Symp. on Autom. Contr. in Space, Dubrovnik, 6–10 September 1971, Beograd, 1971.
7. Chernyshev V.V., Arakantsev V.V. *Ekstremal'naya robototekhnika* (Extreme Robotics), Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, 2016, pp. 245–250. (in Russ.)
8. Shurygin V.A., Serov V.A., Kovshov N.V., Ustinov S.A. *Ekstremal'naya robototekhnika* (Extreme Robotics), Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, 2018, pp. 530–540. (in Russ.)
9. Gavrilov A.E., Leonard A.V., Mishustin O.A., Selyunin D.M., Khantimirova S.B. *Ekstremal'naya robototekhnika* (Extreme Robotics), Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, 2017, pp. 352–357. (in Russ.)
10. Xilun Ding, Zhiying Wang, Rovetta A., Zhu J.M. *Climbing and Walking Robots*, 2010, InTech, pp. 291–309, <http://www.intechopen.com/books/climbingand-walking-robots>.
11. Yilin Xu, Feng Gao, Yang Pan, Xun Chai. *J. Intell. Robot Syst.*, 2017, no. 88, pp. 19–35. DOI 10.1007/s10846-017-0532-7.
12. Nan Hu, Shaoyuan Li, Yuxuan Zhu, Feng Gao. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, no. 94, pp. 179–201. DOI 10.1007/s10846-018-0827-3.
13. Mikhaylov V.V., Solov'yeva T.N., Kuz'min D.V. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* (Problems of Control and Modeling in Complex Systems), Proceedings of the XVIII International Conference, September 20–25, 2016, Samara, pp. 421–429. (in Russ.)
14. Kolesov Yu.B. *Ob'yektno-orientirovannoye modelirovaniye slozhnykh dinamicheskikh sistem* (Object-Oriented Modeling of Complex Dynamic Systems), St. Petersburg, 2004, 238 p. (in Russ.)
15. Mikhailov V.V., Solov'eva T.N., Popov V.P. *Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy*, 2015, no. 6, pp. 34–40. (in Russ.)
16. Mikhaylov V.V., Ivanov N.M. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh* (Problems of Control and Modeling in Complex Systems), Proceedings of the XIX International Conference, September 12–15, 2017, Samara, 2017, pp. 178–185. (in Russ.)
17. Torgashev V.A. *Trudy SPIIRAN* (SPIIRAS Proceedings), 2013, no. 4(27), pp. 23–34. (in Russ.)

#### Data on authors

- Vladimir V. Mikhailov** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling, Leading Researcher; E-mail: mwwcari@gmail.com
- Nikolay M. Ivanov** — PhD; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information and Network Technologies; Associate Professor; E-mail: inm41@yandex.ru
- Dmitry Yu. Kuzmin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg Federal Research Center of the RAS; E-mail: dimazik999666@yandex.ru

**For citation:** Mikhailov V. V., Ivanov N. M., Kuzmin D. V. Automatic component of a walking machine motion control system. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 12. P. 1073—1080 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-12-1073-1080