

УДК 62-529 : 004.415.2

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ\*

В. Ф. Филаретов<sup>1,2</sup>, Д. А. Юхимец<sup>1,2</sup>, Э. Ш. Мурсалимов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,  
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет,  
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8  
E-mail: filaretov@inbox.ru

Предложен подход к построению информационно-управляющей системы (ИУС) движением мобильных роботов (МР) различного вида и назначения. Эта ИУС состоит из универсальных компонентов, обменивающихся между собой данными по интерфейсам, не зависящим от аппаратной части МР. Её использование значительно снижает затраты на разработку МР новых поколений.

*Ключевые слова:* мобильный робот, информационно-управляющая система, комплексирование, программная архитектура.

**Введение.** В настоящее время создание мобильных роботов (МР) для различных сфер человеческой деятельности (бытовой, производственной, военной и т. д.) является одной из актуальных задач развития техники [1, 2]. При этом особо выделяется задача разработки и совершенствования информационно-управляющих систем (ИУС) для МР, которые определяют их свойства и функциональные возможности.

Главная функция ИУС для всех типов МР — обеспечение их высокоточного движения в разных режимах эксплуатации. Однако различный набор бортовых датчиков, вычислительных устройств и исполнительных механизмов МР, предназначенных для решения многих задач, требует длительной и трудоёмкой разработки ИУС для необходимой точности управления конкретными МР.

Сейчас уже созданы стандарты [3, 4] и инструменты [5–7], облегчающие построение ИУС. Наиболее известны платформы ROS, Player Project, MS Robotic Studio, URBI, которые являются базой для универсальных ИУС МР. Большинство из них имеет удобные графические средства, позволяющие не только задать конфигурацию ИУС, но и моделировать движение МР, управляемых этой ИУС. Однако ни одна из указанных платформ не содержит средств для выбора аппаратной части ИУС и её структуры, обеспечивающих качественное функционирование МР. Также следует отметить, что ИУС, созданные на базе ROS, работают только под управлением операционной системы Ubuntu (и экспериментально — OS X, Android), что предполагает наличие производительных бортовых компьютеров. Однако для уменьшения стоимости МР в качестве основных вычислительных узлов ИУС целесообразнее применять дешёвые встраиваемые контроллеры. Проектирование ИУС на платформе Player Project требует проводить обмен данными между элементами всей системы только по протоколу TCP, что существенно ограничивает выбор программной и состав аппаратной частей МР. При использовании MS Robotic Studio необходима поддержка операционной системы Windows. Кроме того, эта программная

\*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-19-00081, разд. 1, 2) и Министерства образования и науки РФ (проект № 14.613.21.0018, разд. 3).

платформа имеет закрытый исходный код, что усложняет её применение для решения нестандартных задач.

В целом проведённый анализ показал, что современные инструменты не позволяют создать эффективную универсальную ИУС для произвольных МР. Однако, поскольку управление движением различных типов МР строится всё же на основе сходных принципов, для упрощения разработки их ИУС целесообразно создать универсальную платформу хотя бы нижнего уровня, в которой тем не менее учитывались бы особенности конкретных МР с помощью задания их математических моделей для функционирования алгоритмов обработки информации. Это позволит разработчикам ИУС в основном сосредоточиваться на реализации более высокоуровневых функций, определяющих основное назначение МР.

Цель данного исследования — создание нового подхода к построению универсальной ИУС для МР различного вида и назначения, в состав которых могут входить разные наборы аппаратных средств, а также исполнительных и сенсорных устройств, необходимых для выполнения этими роботами базовых задач и миссий, в том числе в условиях частичной или полной неопределённости окружающей среды и параметров объектов работ.

**Формирование универсальной архитектуры построения ИУС, реализующей движение МР.** Обобщённая структурная схема создаваемой ИУС представлена на рис. 1. Она содержит постоянный набор модулей, которые реализуют требуемые функциональные свойства, и дополнительные модули, чей состав задаётся аппаратной частью МР. К этим модулям относятся: навигационная система, определяющая текущее положение и ориентацию МР на основе данных, поступающих от бортовых датчиков; система управления, формирующая сигналы управления исполнительными устройствами; система формирования траектории движения МР; система диагностики устройств и систем МР.

Распределённая структура ИУС даёт возможность организовать одновременную реализацию различных вычислительно сложных компонентов на используемых вычислительных устройствах, что обеспечивает гибкую масштабируемость системы.

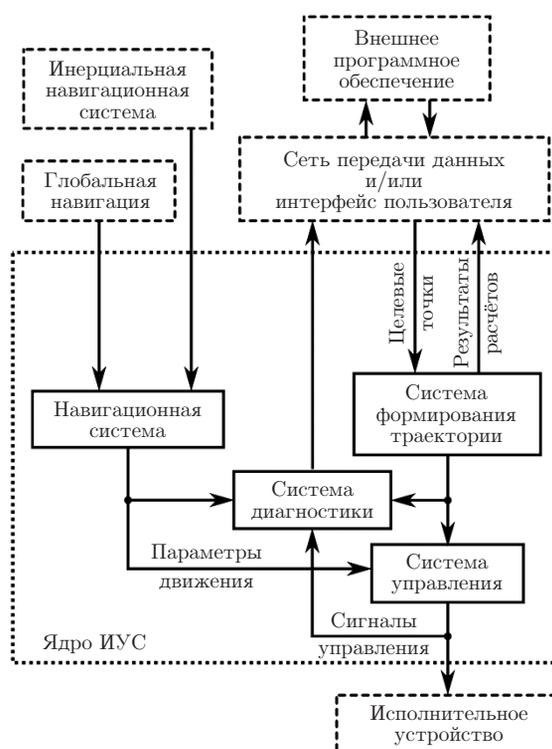


Рис. 1. Структурная схема универсальной ИУС для МР

Для реализации ИУС, представленной на рис. 1, разрабатывается универсальный программный компонент, который может быть реализован на различных платформах [8]. При этом программный интерфейс обмена данными между отдельными компонентами ИУС не зависит от вида пересылаемой информации и аппаратных интерфейсов передачи данных.

Универсальный компонент ИУС разделён на две части (рис. 2): первая часть (CMP) реализует функциональные свойства компонента, а вторая (CMP\_INTERFACE) — взаимодействие с аппаратной частью МР и физическими интерфейсами передачи данных. При этом CMP\_INTERFACE имеет одинаковую структуру для всех типов интерфейсов передачи данных и конфигурируется независимо от функциональной части компонента. Это позволяет сделать функциональную часть независимой от аппаратной части МР и обеспечивает простой перенос созданных компонентов ИУС на МР различных типов. Алгоритм работы функциональной части каждого компонента организован аналогично работе программы микроконтроллера и заключается в последовательном выполнении операторов программы в бесконечном цикле. Это в отличие от традиционных платформ даёт возможность переносить компоненты ИУС (систему управления и навигационные системы) с минимальными изменениями на встраиваемые контроллеры для взаимодействия ИУС с бортовым оборудованием МР с минимальными задержками и максимальной частотой.

Специальный компонент-менеджер реализует только обмен данными между остальными компонентами ИУС по нескольким физическим интерфейсам и протоколам передачи данных. Для этого он хранит информацию о физических и внутренних адресах всех компонентов, расположенных в пределах одного узла. В процессе его работы происходит последовательный опрос всех зарегистрированных интерфейсов и перенаправление полученных сообщений нужному адресату. Отметим, что в состав ИУС для МР должен входить хотя бы один компонент-менеджер.

Далее рассмотрим особенности реализации функциональной части отдельных компонентов ИУС (см. рис. 1), обеспечивающих её успешную работу с МР различных типов.

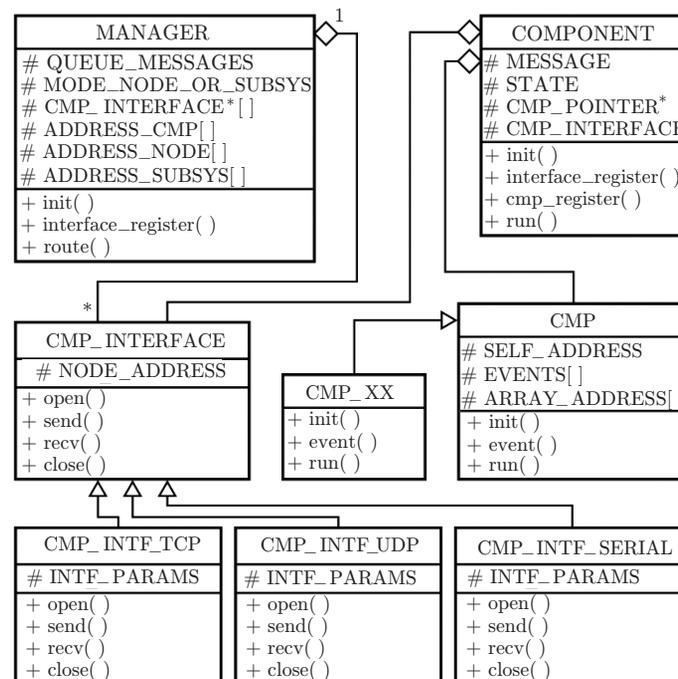


Рис. 2. Диаграмма классов, представляющая компонент-менеджер ИУС

**Реализация функциональных свойств компонентов ИУС.** *Навигационная система.* Традиционно бортовые навигационные системы МР используют датчики инерциальной и глобальной навигации, которые могут иметь разные периоды обновления выходных данных. Часто МР не содержат полного набора бортовых датчиков для определения всех сигналов обратных связей, необходимых для формирования сигналов управления. В этом случае требуется использование специальных алгоритмов обработки данных, поступающих от имеющихся бортовых датчиков МР. В работе [9] метод комплексирования информации с бортовых датчиков подводных роботов предлагается строить на основе сигматочечного фильтра Калмана (СТФК) и кинематических моделей движения этих роботов, которые не содержат неопределённых или переменных параметров. Так как уравнения, описывающие движения различных МР, имеют сходный вид, указанный метод комплексирования можно распространить на все известные типы МР. В матричном виде используемые уравнения движения имеют следующий вид:

$$\dot{\eta} = J(\eta)v, \quad (1)$$

где

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} J_1(\eta) & \vdots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \vdots & J_2(\eta) \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6};$$

$$J_1(\eta) = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & c_\psi s_\theta s_\varphi - s_\psi c_\varphi & s_\psi s_\varphi + c_\psi c_\varphi s_\theta \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\varphi + s_\varphi s_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi c_\varphi - c_\psi s_\varphi \\ -s_\theta & c_\theta s_\varphi & c_\theta c_\varphi \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3};$$

$$J_2(\eta) = \begin{bmatrix} 1 & s_\varphi t_\theta & c_\varphi t_\theta \\ 0 & c_\varphi & -s_\varphi \\ 0 & s_\varphi/c_\theta & c_\varphi/c_\theta \end{bmatrix} \in R^{3 \times 3};$$

$\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T \in R^6$  — вектор положения и ориентации МР в абсолютной системе координат (СК);  $v = [v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T \in R^6$  — вектор проекций линейной и угловой скоростей движения МР на оси связанной с МР СК;  $c_\varphi = \cos \varphi$ ;  $c_\theta = \cos \theta$ ;  $c_\psi = \cos \psi$ ;  $s_\varphi = \sin \varphi$ ;  $s_\theta = \sin \theta$ ;  $s_\psi = \sin \psi$ ;  $t_\theta = \tan \theta$ ;  $[\varphi, \theta, \psi]$  — углы курса (рыскания), крена и дифферента (тангажа) соответственно.

На основе уравнения (1) формируются модели для STFК, которые имеют следующий вид:

$$X_{k+1} = \begin{bmatrix} a_k^T & (a_k \Delta t + v_k)^T & (J(\eta_k) a_k \Delta t^2 / 2 + J(\eta_k) v_k \Delta t + \eta_k)^T \end{bmatrix}^T + \xi_k, \quad (2)$$

$$Y_k = H(X_k) + \zeta_k, \quad (3)$$

где  $X_k = [a_k^T, v_k^T, \eta_k^T]^T \in R^{18}$  — вектор состояния STFК;  $a_k = [\dot{v}_x^k, \dot{v}_y^k, \dot{v}_z^k, \dot{\omega}_x^k, \dot{\omega}_y^k, \dot{\omega}_z^k]^T \in R^6$  — вектор линейных и угловых ускорений МР в связанной с МР СК;  $Y_k \in R^m$  — вектор измерений;  $H(X_k) \in R^m$  — вектор-функция измерения, описывающая связь между данными, полученными от датчиков МР, и параметрами их движения;  $\xi_k \in R^{18}$ ,  $\zeta_k \in R^m$  —

векторы гауссовских шумов системы и измерений соответственно;  $\Delta t$  — шаг дискретизации системы.

Следует отметить, что уравнение (2) одинаково для МР различных типов, а уравнение (3) зависит от набора бортовых датчиков конкретного МР. Так как период обновления данных на выходах различных датчиков практически всегда разный, то в процессе работы ИУС вектор  $Y_k$  и вектор-функция  $H(\cdot)$  измерений имеют изменяющуюся размерность, соответствующую количеству данных, полученных от датчиков, которые обновили выходные сигналы на текущем шаге дискретизации системы. Это в отличие от традиционных подходов, в которых используются  $Y_k$  и  $H(\cdot)$  постоянной размерности, даёт возможность обеспечить формирование вектора  $X_k$  с требуемым периодом. Кроме того, один и тот же параметр движения МР может измеряться несколькими бортовыми датчиками. Такая избыточная информация увеличивает точность оценки соответствующих параметров.

*Компонент формирования программных сигналов движения МР.* Входными сигналами для компонента, реализующего систему управления МР, являются программные сигналы, задающие желаемое положение МР в абсолютной СК. Для большинства МР типовым является позиционный режим движения, обеспечивающий их перемещение от одной точки к другой, однако он не реализует плавное движение. Задавать программные сигналы для МР можно и в виде функций изменения координат целевой точки во времени [10]. Но это требует сложного подбора указанных функций для реализации различных траекторий. Предлагаемый компонент формирования траектории обеспечивает унифицированный вид программных сигналов, определяющих движение МР по гладким пространственным траекториям с требуемой скоростью с учётом заданной последовательности базовых точек.

Такой компонент формирует вектор программных сигналов, задающих положение программной точки  $X^*$ , движущейся по заданной траектории с заданной скоростью  $v^*$ . Алгоритм построения этих программных сигналов состоит из двух этапов.

На первом этапе с использованием сплайнов Безье формируется аналитическое описание гладких траекторий движения МР, проходящих через базовые точки. Пример построения гладкой траектории показан на рис. 3.

Для построения сплайна предварительно рассчитываются положения управляющих точек, которые определяют наклон касательных к строящейся траектории движения в базовых точках:

$$\Delta P_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{\|P_i - P_{i-1}\|}; \quad \Delta P_{i+1} = \frac{P_{i+1} - P_i}{\|P_{i+1} - P_i\|};$$

$$\Delta P_i^C = k_{pi} \|P_i - P_{i-1}\| \frac{(k_{ci} \Delta P_i + (1 - k_{ci}) \Delta P_{i+1})}{\|(k_{ci} \Delta P_i + (1 - k_{ci}) \Delta P_{i+1})\|};$$

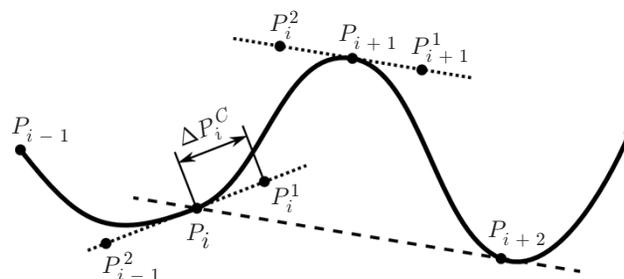


Рис. 3. Построение гладкой траектории, проходящей через базовые точки в установленной последовательности

$$P_i^1 = P_i + \Delta P_i^C; \quad P_i^2 = P_{i+1} - \Delta P_{i+1}^C,$$

где  $P_i = (x_i, y_i, z_i)$  — координаты  $i$ -й базовой точки, через которую проходит траектория движения МР;  $P_i^j$ ,  $j = 1, 2$ , — координаты управляющих точек сплайна;  $\Delta P_i \in R^3$  — единичный вектор коэффициентов наклона прямой в пространстве, проходящей через две соседние базовые точки  $P_i$  и  $P_{i-1}$ ;  $\Delta P_i^C$  — длина отрезка от базовой точки до управляющей;  $k_{pi}, k_{ci}$  — коэффициенты, определяющие расположение управляющих точек сплайна. При этом коэффициент  $0 \leq k_{ci} \leq 1$  задаёт наклон касательной к траектории в базовой точке, а коэффициент  $k_{pi} \geq 0$  — кривизну полученной траектории (при  $k_{pi} = 0$  траектории прямолинейны).

Положение точки  $X^*$  рассчитывается с помощью выражения [11]

$$X^*(\delta) = (1 - \delta)^3 P_i + 3\delta(1 - \delta)^2 P_i^1 + 3\delta^2(1 - \delta) P_i^2 + \delta^3 P_{i+1} = f_B(\delta).$$

Здесь  $\delta$  — переменная, изменение значения которой от 0 до 1 во времени задаёт движение точки  $X^*$  по сплайну между точками  $P_i$  и  $P_{i+1}$ .

На втором этапе происходит расчёт координат точки  $X^*$ , движущейся по сформированной траектории со скоростью  $v^*$ . Для расчёта используется следующий итерационный алгоритм:

- 1) инициализация:  $i = 0$ ;  $T^* = v^* \Delta t$ ;  $X_i^* = X^*(t)$ ;  $\delta_i = \delta(t)$ ;
- 2) выполнение:  $\delta_{i+1} = \delta_i + \Delta \delta$ ;  $X_{i+1}^* = f_B(\delta_{i+1})$ ;  $T_{i+1} = T_i + \|X_{i+1}^* - X_i^*\|$ ;  $i = i + 1$ , пока  $T_{i+1} < T^*$ ;
- 3) если  $T_{i+1} \geq T^*$ , то  $\delta(t + \Delta t) = \delta_i + \frac{T^* - T_i}{T_{i+1} - T_i} \Delta \delta$ ,  $X^*(t + \Delta t) = f_B(\delta(t + \Delta t))$ , иначе  $X^*(t + \Delta t) = X_{i+1}^*$ ,  $\delta(t + \Delta t) = \delta_{i+1}$ .

Здесь  $i$  — номер итерации алгоритма;  $T^*$  — путь, который проходит точка  $X^*$  по траектории за период  $\Delta t$  дискретизации системы, двигаясь со скоростью  $v^*$ ;  $\Delta \delta$  — приращение переменной  $\delta$  на каждой итерации работы алгоритма;  $\delta(k)$  — значение переменной  $\delta_i$ , которое определяет положение точки  $X^*(t)$  на текущем шаге дискретизации ИУС;  $T_i$  — путь, пройденный точкой  $X_i^*$  при изменении переменной  $\delta$  от  $\delta(t)$  до  $\delta_i$ .

Методы реализации компонентов ИУС для МР дают возможность создать ядро универсальной ИУС, обеспечивающее управление движением МР различных типов.

**Исследование особенностей работы предложенной ИУС.** Для изучения особенностей работы ИУС проведено математическое моделирование в среде MATLAB/Simulink с использованием инструментария SimEvent, позволяющего исследовать «дискретно-событийные» системы.

В этой среде была реализована модель ИУС для МР, состоящая из четырёх компонентов, входящих в её ядро (см. рис. 1), и дополнительного компонента-менеджера, осуществляющего маршрутизацию сообщений. В процессе моделирования полагалось, что каждый компонент может генерировать три вида сообщений: «запрос», «ответ» и «событие». При этом сообщения «событие» генерировались в компонентах ИУС с заданной вероятностью на каждый период дискретизации системы, сообщения «запрос» — с заданным периодом, а сообщения «ответ» формировались при получении сообщений «запрос» и отправлялись компоненту, приславшему этот запрос. Все сообщения проходили через специальный компонент-менеджер, который перенаправлял их по заданными адресам получателей. Направления передачи сообщений в ИУС и параметры компонентов представлены в табл. 1. Здесь использованы следующие обозначения компонентов ИУС: СУ — система

Таблица 1

## Параметры компонентов ИУС и направлений передачи сообщений

Наименование параметра	Компоненты				
	СУ	НС	СФТ	СД	КМ
Адрес текущего компонента	1	2	3	4	—
Вероятность появления события на текущем шаге дискретизации	0,0001	0,0001	0,01	0,01	—
Время обработки запроса, с	0,002	0,002	0,004	0,003	—
Время формирования ответного сообщения, с	0,005	—	0,009	0,01	—
Время обработки сообщения, содержащего команду, с	0,003	0,01	0,01	0,007	—
Время выполнения основного алгоритма компонента, с	0,01	0,02	0,012	0,015	—
Время обработки события, с	0,007	0,015	0,011	0,01	—
Приоритет сообщения о возникшем событии [0...15]	12	12	10	13	—
Пропускная способность $r$ канала передачи данных, сообщения/с	[1000, 100]	[1000, 100]	1000	1000	1000
Адреса компонентов, которым отсылаются сообщения вида «событие»	(4)	(1; 3; 4)	(1; 4)	(1; 2; 3)	—
Адреса компонентов, которым отсылаются сообщения типа «запрос»	(2; 3)	—	(2; 4)	(1; 2; 3)	—

управления, НС — навигационная система, СФТ — система формирования траектории, СД — система диагностики, КМ — компонент-менеджер.

Качество работы ИУС оценивалось по следующим показателям.

1. Среднее время  $t_w$  ожидания ответа на запрос в компоненте системы управления. Этот показатель характеризует чистое запаздывание в получении данных о текущем состоянии МР.

2. Средняя длина  $l_q$  очереди сообщений в КМ. Этот показатель характеризует загрузженность коммуникационной подсистемы ИУС.

3. Среднее время  $t_{tr}$  прохождения сообщения через компонент-менеджер. Эта величина характеризует задержку в маршрутизации сообщений.

4. Отношение  $\zeta$  количества сообщений, отброшенных по истечении заданного времени ожидания, к общему количеству сообщений.

Таблица 2

## Результаты моделирования процесса функционирования ИУС для МР

$r$ , сообщения/с	$h$ , с	$t_w$ , с	$l_q$	$t_{tr}$ , с	$\zeta$
1000	0,1	0,65	0,1	0,0008	0/14000
	0,05	0,038	0,22	0,0008	0/29000
	0,02	0,035	0,6	0,0008	0/70000
	0,01	0,14	50	0,05	9000/100000
100	0,1	0,1	0,38	0,0025	0/14000
	0,05	0,072	0,75	0,0025	0/29000
	0,02	4	24	0,04	24000/24000
	0,01	—	—	—	—

Результаты моделирования показаны в табл. 2. Из таблицы видно, что при уменьшении периода дискретизации  $h$  в ИУС возрастает количество сообщений, генерируемых её компонентами. В этом случае существенное влияние на работу ИУС начинают оказывать ограничения, накладываемые на пропускную способность каналов передачи данных. Кроме того, видно, что при уменьшении периода дискретизации с 0,1 до 0,02 с в ИУС с пропускной способностью каналов в 1000 сообщений/с время ожидания ответа на сообщение меняется с 0,065 до 0,035 с. Уменьшение пропускной способности каналов связи до 100 сообщений/с делает ИУС неработоспособной при периоде дискретизации менее 0,04 с. Причём понизить период дискретизации ИУС до 0,01 с не удаётся даже при увеличении пропускной способности каналов связи, так как в этом случае негативное влияние начинает оказывать большое время работы алгоритма обработки данных в компонентах ИУС ( $t_w$  при уменьшении периода дискретизации с 0,02 до 0,01 с возрастает с 0,035 до 0,14 с). Для получения требуемого времени дискретизации 0,01 с (и менее) необходимо в 2 раза уменьшить время обработки данных в навигационном компоненте и компоненте системы управления. Это может быть реализовано более производительным процессором.

**Заключение.** Предложенный подход к построению ИУС обеспечивает создание систем за счёт использования компонентов, в которых реализация их функциональных свойств отделена от аппаратных частей МР. Для реализации всех компонентов ИУС применяются универсальные алгоритмы, что облегчает её использование на различных МР. Результаты моделирования работы предложенной ИУС показывают, что она может быть применена для управления МР, имеющими разные частоты формирования управляющих сигналов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Field and Service Robotics.** Results of the 8th International Conference /Eds. K. Yoshida, S. Tadokoro. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 658 p.
2. **Григорьев С. Н., Андреев А. Г., Ивановский С. П.** Современное состояние и перспективы развития промышленной робототехники // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 30–34.
3. **Казанцев В. Н., Котенев В. Д., Павлов В. А.** Состояние и проблемы стандартизации в области робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 3(4). С. 17–21.
4. **SAE Standards** // SAE International. URL: <http://standards.sae.org/> (дата обращения: 3.03.2015).

5. **Robotic** Operating System (ROS). URL: <http://www.ros.org/> (дата обращения: 3.03.2015).
6. **Microsoft** Robotics Developer Studio 4 (RDS 4) // Microsoft Developer Network. 2012. URL: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/bb648760.aspx> (дата обращения: 3.03.2015).
7. **Urbi** Open Source. URL: <http://www.gostai.com/products/urbi/index.html> (дата обращения: 27.08.2015).
8. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.** Создание универсальной архитектуры распределённого программного обеспечения мехатронного объекта // Программная инженерия. 2012. № 7. С. 14–21.
9. **Филаретов В. Ф., Юхимец Д. А., Мурсалимов Э. Ш.** Метод комплексирования данных с навигационных датчиков подводного аппарата с использованием нелинейного фильтра Калмана // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 8. С. 64–70.
10. **Siciliano B.** Handbook of Robotics. Berlin — Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 1611 p.
11. **De Boor C.** A Practical Guide to Splines. Springer, 2001. Ser. Applied Mathematical Sciences. Rev. 27. 366 p.

*Поступила в редакцию 3 марта 2015 г.*

---