

Комплекс для изучения энергетически автономных коллективов роботов

В статье рассматривается проект создания учебно-исследовательского программно-аппаратного комплекса, предназначенного для использования в образовательной проектной деятельности и основанный на тематике энергетически автономной робототехники.

Важной особенностью комплекса является междисциплинарность, так как робототехника объединяет в себе множество областей науки и техники: механику, конструирование, электронику, программирование, элементы искусственного интеллекта, энергетику и другие. Учащиеся получают базовые знания в этих областях и практические навыки по решению реальных задач, требующих конвергентного подхода.

Комплекс является показательным экспериментальным базисом, позволяющим изучать особенности управления роботом и его программно-аппаратную структуру при внесении конструктивных изменений, в том числе и при использовании различных энергетических блоков: солнечных, топливных, термоэлектрических и других. Энергетические блоки — преобразователи и источники различной возобновляемой энергии — можно рассматривать как с теоретической точки зрения, т.е. со стороны принципов их функционирования, так и с практической — знакомиться с их применением в реальных системах. Другой важный аспект работы с комплексом — разработка программной архитектуры робота и коллектива роботов,

изучение особенностей взаимодействия между ними. Помимо выполнения целевой задачи, в алгоритме функционирования робота должны учитываться вспомогательные задачи, такие как поддержание уровня заряда аккумулятора, коммуникация с другими членами коллектива при многоагентном управлении, что позволяет изучать распределение приоритета между этими задачами, что показано на примере многокритериальной оптимизации.

Прототип комплекса и работа с ним согласно описываемому подходу была частично апробирована путём проведения вычислительных экспериментов с алгоритмами, основанными на различных поисковых методах — случайном поиске, поиске ближайшего источника и методе многокритериальной оптимизации, — многоагентной парадигме, адаптивном управлении, которые показывают разнообразие возможных подходов и иллюстрируют процесс работы учащихся с комплексом. Аппаратная база апробировалась тестированием различных энергетических модулей, а также сборкой робота из модулей предложенной элементной базы. Результаты показали возможность и перспективность изучения разнообразных междисциплинарных тем с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса.

Ключевые слова: групповая робототехника; энергетическая автономность; учебный набор; сбор энергии; мобильный робот.

Maxim A. Rovbo¹, Aleksandr A. Malyshev^{1, 2}

¹ National Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

² National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Energetically self-sufficient robot group study kit

The article considers the project of educational and research software and hardware kit, designed for the use in educational project activities, based on the theme of energetically autonomous robots.

An important feature of the complex is its interdisciplinarity since robotics combines many fields of science and technology — mechanical design, electronics, programming, elements of artificial intelligence, energy science and others. Students can receive basic knowledge in these areas as well as gain practical skills in solving real problems that require a convergent approach.

The kit serves as an experimental basis that allows studying intricacies of robot control and its hardware and software design while making structural changes, including using different power units: solar, fuel, thermoelectric and others. Power units (converters and the various sources of renewable energy) may be considered both from the theoretical point of view, i.e. from the principles of their functioning and from the practical aspect — studying their practical application in real systems. Another important aspect of the system is the development of software architecture for a robot and for a team of robots as well as studying the interactions between them. In addition to perform

the target task, ancillary tasks such as maintaining the battery level, communication with other team members in a multi-agent system, should be considered in the control algorithm of the robot, which allows studying the distribution of priorities between these objectives, as shown in the example of multicriteria optimization.

The prototype of the kit and its usage according to the described approach have been partially validated by conducting computational experiments with algorithms based on different search methods (random search, closest source and multi-criteria optimization methods), multi-agent paradigm and adaptive control which show a variety of possible approaches and illustrate the process of students' work. The hardware base has been validated by testing various energy modules and robot assembling, using the modules of the proposed kit. The results showed the possibility and potential of studying a variety of interdisciplinary themes, using the developed hardware and software complex.

Keywords: group robotics; energy self-sufficiency; educational kit; energy collection; mobile robot.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ №16-11-00018 (раздел «Системы групповой робототехники и многоагентный подход», частично введение).

Введение

Проектный подход в обучении в настоящее время считается перспективным методом, приближающим процесс обучения к условиям решения реальных задач, стимулирующим интерес учащихся к изучаемой теме, дающим им разносторонние навыки, в том числе те, которые связаны с работой командами и позволяющим учащимся с разными интересами и уровнем подготовки одновременно работать над решением одной проблемы [1]. Несмотря на некоторую неопределённость в толковании термина «проектная деятельность» [2], эти и другие преимущества неоднократно обсуждались в литературе [3, 4] и особенности применения подхода анализировались на практических примерах [5].

Применение проектного подхода для обучения в сложных новых областях требует подготовленного оборудования и специалистов, способных направлять процесс творческого поиска учащихся и получения ими соответствующих знаний, а также конкретики в определении исследуемой проблемы. Для этого необходимо ограничиться рассмотрением определённого круга задач, тематически связанных друг с другом, давать обзорную информацию по ряду методов, применяющихся для решения задач в рассматриваемой и смежных областях и предлагать группе проблемы, способствующие использованию предоставленных материалов. В то же время, чтобы предоставить возможность учащимся получить базовые знания и навыки из различных областей и задействовать умения из различных областей, необходимо выбрать такую предметную область, которая соединяет в себе разные области. Одной из таких дисциплин является робототехника, являющаяся синергетической областью, естественным

образом сочетающей в себе механику, электронику, а также различные науки, относящиеся к разработке программ и алгоритмов и смежные области.

В данной статье предлагается подход к созданию учебно-методического комплекса на основе разработанного междисциплинарного комплекса, предназначенного для использования в проектной деятельности при разработке и изучении энергетической автономности роботов. Он представляет из себя набор модулей, позволяющих собирать мобильных роботов, экспериментировать с различными энергетическими элементами по отдельности, изучать работу группы роботов и соответствующие алгоритмы, осваивать смежные области. В отличие от подхода к проектной деятельности, в которой кейс выбирается и строится под изучаемую область целиком, включая подбор соответствующего материала (например, кейсы, описанные в [6]), описываемый комплекс предлагается использовать как единую базу для ряда кейсов, причём решения могут предлагаться ориентированные на различные аспекты системы: к примеру, повысить энергоэффективность системы можно как умелой оптимизацией алгоритма одного устройства, так и использованием координирующей группы роботов. Преимуществами предлагаемого подхода являются:

- междисциплинарность и непосредственная взаимосвязь между областями в рамках одного проекта;
- привлечение учащихся к решению актуальных научно-технических задач;
- ознакомление учащихся с некоторыми современными проблемами области одновременно с возможностью изучения стандартных учебных дисциплин в рамках проектного подхода.

В настоящее время активно развивается мобильная робототехника, расширяется круг практических задач, в которых применяются роботы. В связи с использованием роботов вне специально подготовленных зон, таких как производственные помещения, возникает множество проблем, связанных с их безопасной и надёжной работой. Одним из аспектов автономности является энергетическая независимость: робот должен работать максимально длительное время с минимальными затратами на его обслуживание в плане подзарядки. Сейчас наиболее распространённой является схема эксплуатации, при которой пополнение запаса энергии осуществляется человеком, меняющим на работе аккумуляторы, пополняющим его топливный запас или подключающим к сети электропитания. Для применения в длительных миссиях, в особенности космических, используются невозполняемые источники энергии, например, на основе радиоактивных изотопов, которые способны длительное время обеспечивать устройство энергией, а также солнечные панели в комбинации с аккумуляторами для медленного пополнения запасов. Тем не менее, в силу дороговизны подобных решений, ограниченности энергозапаса, который может взять с собой робот, и скорости пополнения при использовании солнечной энергии (а также её доступности в различных погодных условиях при наземном применении), вопрос автономного сбора и хранения энергии для решения целевых задач остаётся как никогда актуальным.

Энергетическая автономность технических устройств актуальна не только для роботов. Например, носимая электроника и беспроводные датчики, потребляющие сравнительно небольшую мощность, могут использовать один из способов

сбора энергии: солнечной, механической (вибрации), тепла и других. Но энергопотребление роботов и сложность среды, в которой они работают, значительно выше, чем у перечисленных устройств. В то же время, у мобильных роботов есть возможность взаимодействовать со своей средой и перемещаться в ней. Для использования этого преимущества и компенсации повышенных энергозатрат роботов требуется создание особых адаптивных алгоритмов управления отдельными единицами и группами роботов, позволяющих им эффективно работать в меняющейся среде, справляться со сбоями в системе и балансировать выполнение целевой функции со сбором энергии.

Содержание статьи организовано следующим образом. Сначала описывается проблематика области энергетической автономности робототехнических систем, далее идут разделы, описывающие отдельные аспекты учебного комплекса с пояснениями стоящей за ними теории и проблем, которые могут быть затронуты: энергетические источники, аппаратно-программная структура отдельных роботов, алгоритмическое обеспечение отдельного робота и объединение роботов в группу для достижения совместных целей.

тически применимые в исследуемой области.

Солнечные панели. Одним из самых часто используемых источников является солнечная энергия. Солнечные панели повсеместно применяются, где позволяют условия окружающей среды. Они преобразуют солнечный свет в электрическую энергию. Преобразование энергии основано на фотовольтаическом эффекте, который характеризуется появлением напряжения или электрического тока в веществе под воздействием света. В настоящее время эффективность солнечных панелей колеблется от 9 % до 44,4 % [8]. На потребительском рынке встречаются в основном панели, эффективность которых составляет около 19 % [9]. Выходные характеристики панели связаны с её площадью. Уже сравнительно небольшие панели с площадью 80 см² обеспечивают мощность в 1 Вт [10].

Элемент Пельтье – термоэлектрический преобразователь энергии. Представляет собой множество соединённых последовательно термопар. Работа элемента основана на эффекте Пельтье, заключающемся в поглощении или выделении тепла при прохождении электрического тока в месте спая двух разнородных проводников. Однако имеет место и обратный эффект, т.н.

эффект Зеебека – возникновение ЭДС в цепи разнородных проводников, последовательно соединённых, когда их контакты находятся при различных температурах. Таким образом, можно получать энергию, обеспечивая разность температур на обкладках элемента Пельтье.

Топливные элементы. Ещё одним активно используемым источником энергии является топливный элемент. Топливом являются спирты (этиловый, метиловый), водород, другие вещества. Конструкция элементов очень схожа для всех видов топлива – два электрода (катод и анод), между которыми располагается электролит (мембрана). Энергия вырабатывается за счёт электрохимической реакции [11]. Существенным недостатком топливных элементов на спиртах является их ядовитость.

Биотопливные элементы. Другими видами топливных элементов являются биотопливные элементы (БТЭ) – ферментные, микробные, с абиотическим катализатором [12]. Эти элементы разрабатываются в том числе и для очистки сточных вод от органических примесей, что положительно сказывается на экологии. Однако пока что их выходные характеристики невелики (см. табл. 1).

Пробные источники. Простой гальванический элемент

1. Энергетические источники

Существует ряд уже устоявшихся источников альтернативной энергии, используемых в настоящий момент: солнечные, энергия ветра, гидроэнергия, тепловые и геотермальные, биоэнергетические, некоторые другие [7]. Однако не все они подходят для использования в мобильной робототехнике. В первую очередь это связано с условиями эксплуатации, размерами и массой установок. Поэтому далее рассматриваются только источники, гипоте-

Сравнение характеристик преобразователей энергии

Таблица

	Напряжение, В	Мощность установок, мВт	Условия эксплуатации
Идеальный источник	5	1000	Любые
Солнечная батарея	6–12	1250	Солнечная погода
Элемент Пельтье	16	40000	Разность температур на пластинах элемента
Самодельный гальванический элемент из мандарина	1,5	0,15	Любые
Спиртовая ячейка	0,5	40	Любые
Ферментный БТЭ [13]	0,5	288	Рабочая температура не выше 37° С
Микробный БТЭ [14,15]	–	4,8	Рабочая температура не выше 37° С
ТЭ с абиотическим катализатором [16]	0,8	36,8	Ограничивается термостабильностью конструкционных материалов



Рис. 1. Модульное представление робота

можно сделать из обычных фруктов и овощей. Так как плоды содержат в себе слабые растворы кислот, их можно использовать в качестве электролита. Поместив в плод пару электродов, с их концов можно снять напряжение. Источник интересен своей наглядностью, а разнообразие плодов и материалов для электродов позволяет проводить большое количество экспериментов.

Таблица содержит сводную информацию о рассмотренных источниках (для элемента Пельтье приведена максимальная теоретическая оценка показателей; на реальных экспериментах данные заметно отличаются в худшую сторону – сказываются потери при передаче тепла, проблемы с охлаждением одной из обкладок). Показатель мощности рассчитывается для установки с размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ см}^3$ – такой объём принят за единицу размерности энергетической установки. Установка располагает одним «идеальным источником» и одной парой электродов для самодельного гальванического элемента. Реализацией «идеального источника» приближённо считается индукционный источник, обеспечивающий мощность в 1 Вт при 5 В, от которого можно зарядиться в любое время, в любом месте, независимо от состояния внешней среды. Он рассматривается как источник, с показателями которого сравнивают показатели других

источников. Удобен он для рассмотрения из-за его повсеместной доступности, независимости от состояния окружающего мира и предсказуемых показателях в любой точке испытательного полигона. Для остальных элементов удельная мощность рассчитывается, исходя из количества элементов, которые могут быть размещены в объёме установки.

В основе работы многих рассмотренных преобразователей энергии лежат явления физики и химии, изучаемые в школе. Использование в образовательном наборе подобных элементов позволяет прово-

дить эксперименты, наглядно показывая те явления, которые ими изучались в теории.

2. Модульная программно-аппаратная конструкция

Образовательный набор включает модули – функционально обособленные, физически отделённые элементы, – и конструктивные элементы – крепления модулей, соединительные трубки. На первом этапе проектирования проектная группа выбирает модули, которыми она будет оснащать платформу. На рис. 1 представлен пример структуры подобной системы.

Стоит заметить, что в этой структуре есть варьируемые части – энергетические модули. В зависимости от окружающей среды, в которой планируется использовать робота, выбирается его энергетическое оснащение.

Модуль управления исполняет управляющую программу, служит для координации работы всех подсистем робота. Если необходимо связаться с

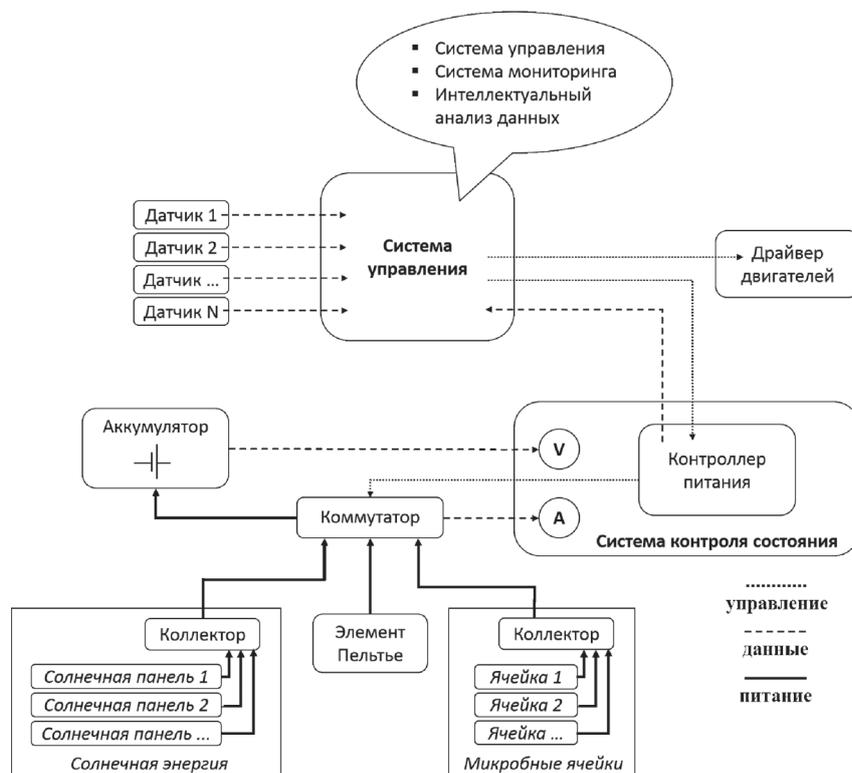


Рис. 2. Программно-аппаратная архитектура робота

компьютером, можно использовать *модуль связи*. *Модуль питания* включает в себя всю систему питания и контроля за ним: батарею, систему контроля состояния, коммутатор (используется для подключения энергетических модулей к аккумулятору). *Энергетические модули* – модули, обеспечивающие получения энергии из возобновляемых источников.

На рис. 2 представлен пример программно-аппаратной архитектуры робота. В зависимости от решаемой задачи архитектура может изменяться: добавляются новые энергетические модули, используются дополнительные модули двигателей, новые датчики.

3. Многокритериальный выбор источника

Когда перед роботом ставятся две конкурирующие задачи – «выживание» в среде и выполнение некоторой целевой задачи, – встает вопрос: выполнение какой задачи приоритетнее в настоящий момент. Так как основным предназначением робота является выполнение целевой задачи, приоритет у неё выше; однако, когда появляется угроза существованию робота, например, возникает препятствие на пути следования, или аккумулятор практически разряжен, вопрос самосохранения оказывается важнее, и робот должен прервать выполнение целевой задачи. Когда выходит из опасного состояния, он возвращается к выполнению целевой задачи.

Та же проблема выбора встает перед роботом, когда ему приходится выбирать между несколькими источниками – все они различаются по типу используемой энергии, удалённости, продолжительности существования, состояние окружающей среды так же может влиять на «качество» источника (например, зарядиться от солнца в пасмурный

день намного труднее и дольше, чем в солнечный) – эти и другие характеристики могут влиять на оценивание источников.

Существует огромное количество методов, которые можно использовать для принятия решения, такие как скаляризация, интерактивный метод, генетические алгоритмы, математическое программирование. Проектная группа может пользоваться любым из существующих.

Для примера возьмём известную разновидность скаляризации – метод взвешенной суммы, являющийся оптимальным по Парето [17].

$$F = c_1K_1 + c_2K_2 + c_3K_3 + \dots + c_nK_n = \sum_{i=1}^n c_iK_i, \quad (1)$$

где F – результирующий показатель качества источника;

K – критерий;

c – вес критерия в модели (должен быть строго положительным).

От того, насколько хорошо будет настроен поиск, т.е. заданы критерии и их веса в модели, зависит качество исполнения целевой функции. Для того чтобы применить этот метод необходимо выбрать весовые параметры, которые означают приоритет источника при выборе в конкретной среде.

Выбор данных параметров непосредственно влияет на эффективность работы системы и потому требует оптимизации. Перед группой учащихся ставится задача определения критериев и их значимости для системы. Им предлагается включать конструктивные элементы (включая источники), поработать с теорией, порассуждать над важностью различных явлений, взглянуть на них с другого угла. Оценка качества выполнения задачи производится по следующему принципу: лучшей является та модель, которая прошла наибольшее количество кругов за фиксированный промежуток времени.

Рассмотрим следующий пример: перед учащимися поставили задачу – провести моделирование патрулирования территории роботом и сравнить несколько алгоритмов поиска источников энергии для подзарядки. Для проверки качества работы алгоритма можно использовать количество кругов, которое проходит робот за фиксированное время; проверка алгоритмов осуществляется при различной плотности распределения источников, показывающей какой процент территории занимают источники. В модели плотность меняется от 0.1 до 0.9 с шагом 0.2. Группа решила, что

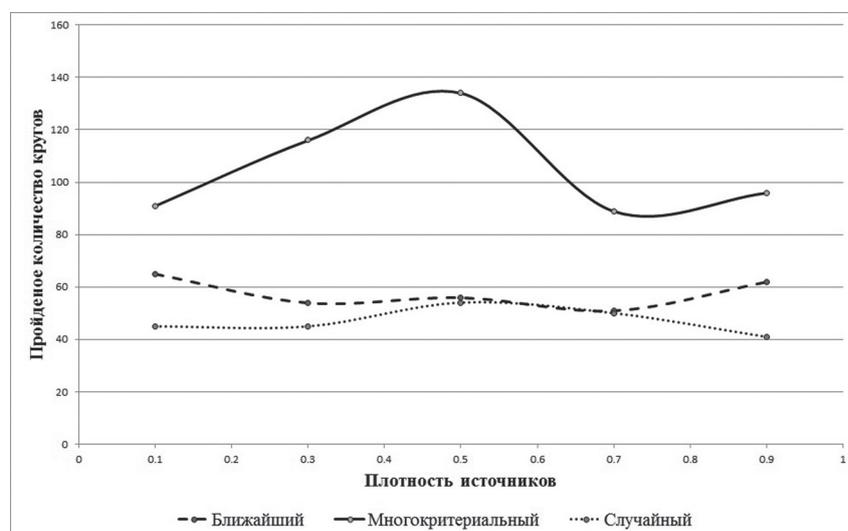


Рис. 3. Эффективность алгоритмов выбора источника энергии

робот будет подзаряжаться от трёх источников: солнца, термоэлектрического источника и биотоплива. Для сравнения выбрали три алгоритма: случайный поиск источника, ближайший источник и многокритериальный поиск с двумя равнозначными критериями: дистанция до источника и тип источника. В последнем случае выражение (1) принимает вид $F = 0,5d + 0,5St$.

Робот перемещается по полигону фиксированное время, выполняя исследовательскую функцию и подзаряжаясь по мере необходимости. По истечению установленного времени, фиксируется пройденное количество кругов. Эксперименты проводятся для всех алгоритмов. На рис. 3 изображён график зависимости количества пройденных роботом кругов от плотности распределения источников. Из него видно, что самым лучшим алгоритмом является многокритериальный поиск, а худшие показатели дал случайный поиск. Наличие явного экстремума на графике многокритериального поиска можно связать с несовершенством модели.

Вовлечение в процесс моделирования нескольких групп учащихся позволяет внести соревновательный элемент. Поэтому разработку алгоритмов и получение результатов можно поручить нескольким группам, что повысит интерес к процессу.

4. Системы групповой робототехники и многоагентный подход

Учащимся предлагается в рамках комплекса изучить также задачи разработки архитектуры роботов. Их можно условно разделить на задачи создания архитектуры отдельного робота (внутренняя структура его программы) и архитектуры группы роботов — структуры их взаимодействий, каналов связи между ними,

протоколов и т.п. Учащимся предлагается освоить навыки разработки архитектуры роботов как классическим подходом построения иерархии уровней управления, так и реализовать многоагентный подход к построению архитектуры отдельного робота.

Идея многоагентного подхода заключается в данном случае в разделении общей архитектуры управления на отдельные обособленные части, каждая из которых инкапсулирует конкретную задачу, например, поддержание уровня энергии робота в приемлемых рамках, или приближение к целевой позиции. Выделенные виртуальные агенты должны управлять одними и теми же актуаторами, поэтому каждый агент вносит свой вклад в действия робота. Итоговое действие может вычисляться на основе различных алгоритмов: суммирование выходов с весами, голосование и т.д. Некоторые из этих методов также применимы для управления группой роботов, что подробнее описано далее.

Групповая робототехника. Одним из подходов к решению сложных задач в робототехнике является построение коллектива роботов, кооперирующихся друг с другом для достижения определённых целей. При этом возможным становится использовать распределённость системы в пространстве, а решения сложной задачи можно достичь не только путём усложнения конструкции роботов, но увеличением группировки относительно простых роботов. В рамках предлагаемого подхода учащиеся смогут научиться решать такие задачи групповой робототехники как фуражирование, стайная охота, передвижение группой и другие.

Этот подход можно применить и для изучения способов решения проблемы энергетической автономности группы

роботов, что подтверждается рядом работ, показывающих как повышение эффективности сбора и использования энергии [18,19] так и перспективность подхода для решения проблемы энергетической автономности роботов в реальных условиях [20]. Идеей использования группы в этом случае является распределение задач между роботами: целевой, для которой и создаётся робототехническое решение, задачей сбора энергии и поддержания работоспособности группы (энергетическая автономность), и прочих, вспомогательных задач, таких как построение карты местности или нахождение ключевых объектов.

Построение такой группы можно осуществлять по разным принципам. Одним из направлений исследований в групповой робототехнике является изучение биологических систем с целью применения принципов их организации для построения коллектива роботов (биоинспирированные алгоритмы). Это объясняется тем, что живые системы зачастую демонстрируют достижение многих желаемых качеств робототехнических систем: устойчивость к внешним воздействиям, работа в неизвестной среде, эффективность и т.д. В случае с распределёнными мобильными системами, собирающими энергию, естественным примером являются эусоциальные коллективы, например, муравьи. Для создания искусственных систем, работающих по схожим принципам, необходимо реализовать соответствующие механизмы, составляющие основу искусственного социального коллектива. Такие системы будем называть коллективами с социальной структурой.

Основных социальных механизмов, которые необходимо исследовать и реализовать в робототехническом коллек-



Рис. 4. Сбор пищи (серые квадраты) муравьями (тёмные точки) с использованием направленных феромонов (продолговатые отметки)

тиве, весьма много [21], что даёт большой простор как для проведения исследований, так и для поиска решений в проектной деятельности. Возможно изучать и успешно применять и отдельные аспекты эусоциальных групп, а также различным образом формулировать саму задачу построения энергетически автономного коллектива. Одной из возможных постановок этой задачи является построение системы, выполняющей некую целевую задачу, например, патрулирование территории, со свойством территориального гомеостаза (т.е. устойчивой работы, в данном случае поддержанием уровня энергии, в меняющихся условиях [22]): система должна поддерживать свою автономную работу одновременно с выполнением задачи на ограниченной и фиксированной территории. Классическим примером формальной постановки задачи для подобной группы робототехнических агентов является задача фуражирования [23,24] (сбор пищи группой «муравьёв»).

Групповое фуражирование. Рассмотрим применение механизма распределения ролей для решения задачи территориального гомеостаза, продемонстрированного в работе [25], где задача рассматривается исключительно

с позиций поддержания работоспособности группы, т.е. оптимизации сбора энергии с территории. Для изучения алгоритмов в групповой робототехнике зачастую используется имитационное моделирование, чтобы снизить стоимость и ускорить изучение взаимодействий больших групп, поэтому далее будем рассматривать задачу на примере использования одной из сред моделирования (Repast Simphony [26]). Это также демонстрирует возможность разделения в ходе проектной деятельности ответственности за различные части системы между участниками: кто-то может независимо разрабатывать алгоритм, в то время как другие – заниматься проектированием отдельного устройства или изучением эффективности источников энергии.

В данном примере модель (см. рис. 4) представляет собой двумерный мир, на котором группа агентов (роботов) собирает энергию из возобновляемых источников в центральное хранилище («муравейник»). При переложении задачи на реальные устройства, необходимо также введение возможности пополнения бортовой системы робота энергией из

гнезда, но для рассмотрения особенностей алгоритма рассматривается упрощённая задача. Каждый робот обладает набором параметров, от которых зависит его поведение, в частности, склонность двигаться по оставляемым «феромонам», хранящих информацию о направлении на источник пищи, и максимальное удаление от «гнезда». Эти параметры могут принимать несколько наборов, каждый из которых называется «ролью». Это позволяет выделить несколько типов агентов: разведчики, которые могут далеко отходить от «гнезда» для нахождения новых источников энергии и «носильщиков», которые склонны передвигаться на короткие дистанции по феромонным следам. Коммуникация между агентами осуществляется исключительно феромонами. При возвращении в гнездо, в зависимости от успешности выполнения агентом своей роли, он может с некоторой вероятностью переключиться в другую роль, что обеспечивает адаптацию группы к внешним условиям.

Одним из наблюдаемых эффектов является выход некоторых агрегированных характеристик (например, соотношение ролей в группе и скорости сбора энергии на

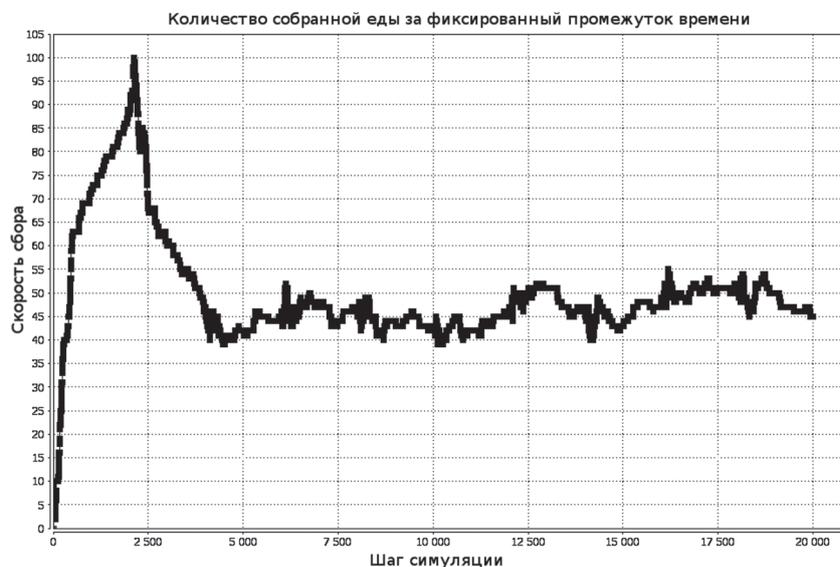


Рис. 5. Выход на установившуюся скорость сбора энергии

рис. 5) на установившиеся значения. Скорость сбора энергии в окне времени можно использовать как критерий эффективности работы группы роботов.

Изменения в любой из ниже лежащих моделей влекут за собой другое поведение коллектива, поэтому их выбор, несомненно, важен. Сам метод, в некотором смысле, является управлением с помощью параметрической регуляции, при которой параметрами коллектива выступают характеристики агентов, влияющие на их поведение. Это позволяет использовать алгоритмы поведения отдельного робота, рассмотренные в предыдущем разделе, как базу, параметры которой управляются алгоритмом следующего уровня.

Обсуждение и заключение

Таким образом, предложенный междисциплинарный подход к проектному обучению ставит приоритет на получении учащимися знаний о современных проблемах в различных областях, в то же время позволяя усвоить информацию об основах, и подчеркнуть особенности реальных задач, в которых знания из смежных областей должны одновременно применяться в рамках одного проекта. Достичь данной цели предлагается с помощью построения проектной деятельности на основе единого разработанного программно-аппаратного комплекса, построенного вокруг тематики энергетически автономной групповой робототехники, и руководства спе-

циалиста в области, который сможет направлять учащихся в изучении и применении полученных знаний для реализации проекта.

Этот комплекс позволяет изучать механику, экспериментировать с разнообразными источниками сбора энергии, в том числе микробными ячейками, исследовать алгоритмы управления одним и группой роботов. Основные идеи, изложенные в статье, были частично апробированы путём проведения соответствующих экспериментов и выполнения некоторых характерных задач с помощью средств, поддерживаемых данным комплексом. Эти решения были описаны в разделах статьи про многокритериальный выбор источника и задачу фуражирования.

Литература

1. *Махотин Д.А.* Проектный подход к технологии обучения в системе высшего профессионального образования // Подготовка специалистов в области менеджмента качества. 2005. № 1. С. 11–21.
2. *Фещенко Е.М.* Проектный подход и его роль в формировании профессиональной компетентности педагога-психолога // Образование и общество. 2008. № 6. С. 54–59.
3. *Петегем В.В., Каменски Х.* Образование для инноваций (применение передовой методики преподавания в ЮФУ). Южный Федеральный университет, 2009. 120 с.
4. *Переверзев Л.Б.* Проектный подход к образовательным проблемам // Методология учебного проекта. Сборник статей. Москва: МИОО, 2001.
5. *Павловская С.В., Сироткина Н.Г.* Анализ опыта проектной деятельности при преподавании управленческих дисциплин в вузах // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4.
6. *Сафонова Е.И.* Рекомендации по использованию инновационных образовательных технологий в учебном процессе. Москва: Российский государственный гуманитарный университет, 2011. С. 71.
7. *Adib R., Murdock H.E., Appavou F., Brown A., Epp B., Leidreiter A., Lins C., Murdock H.E., Musolino E., Petrichenko K., Farrell T.C., Krader T.T., Tsakiris A., Sawin J.L., Seyboth K., Skeen J., Sovacool B., Sverrisson F., Martinot E.* Renewables 2016 Global Status Report // Global Status Report.

References

1. *Makhotin D.A.* Proektnyy podkhod k tekhnologii obucheniya v sisteme vysshego professional'nogo obrazovaniya // Podgotovka spetsialistov v oblasti menedzhmenta kachestva. 2005. № 1. Pp. 11–21. (in Russ.).
2. *Feshchenko E.M.* Proektnyy podkhod i ego rol' v formirovani professional'noy kompetentnosti pedagoga-psikhologa // Obrazovanie i obshchestvo. 2008. № 6. Pp. 54–59. (in Russ.).
3. *Petegem V.V., Kamenski Kh.* Obrazovanie dlya innovatsiy (primenenie peredovoy metodiki prepodavaniya v YuFU). Yuzhnyy Federal'nyy universitet, 2009. 120 P. (in Russ.).
4. *Pereverzev L.B.* Proektnyy podkhod k obrazovatel'nyim problemam // Metodologiya uchebnogo proekta. Sbornik statey. Moskva: MIOO, 2001. (in Russ.).
5. *Pavlovskaya S.V., Sirotkina N.G.* Analiz opyta proektnoy deyatel'nosti pri prepodavanii upravlencheskikh distsiplin v vuzakh // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. № 4. (in Russ.).
6. *Safonova E.I.* Rekomendatsii po ispol'zovaniyu innovatsionnykh obrazovatel'nykh tekhnologiy v uchebnom protsesse. Moskva: Rossiyskiy gosudarstvennyy gumanitarnyy universitet, 2011. 71 P. (in Russ.).
7. *Adib R., Murdock H.E., Appavou F., Brown A., Epp B., Leidreiter A., Lins C., Murdock H.E., Musolino E., Petrichenko K., Farrell T.C., Krader T.T., Tsakiris A., Sawin J.L., Seyboth K., Skeen J., Sovacool B., Sverrisson F., Martinot E.* Renewables 2016 Global Status Report // Global Status Report.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY (REN21), 2016. 272 с.

8. *Mathias*. Solar Cell Efficiency World Record Set By Sharp – 44.4% [Электронный ресурс]. 2013. URL: <http://cleantechnica.com/2013/06/23/solar-cell-efficiency-world-record-set-by-sharp-44-4>.

9. *Schultz, O., A. Mette, R. Preu, Glunz S.W.* Silicon solar cells with screen-printed front side metallization exceeding 19% efficiency // 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2007. С. 980–983.

10. *Seed Studio*. «1w Solar Panel 80*100» [Электронный ресурс]. 2010.

11. *Кривобоков В.П., Согоучов Н.С., Соловьёв А.А.* Электрохимия топливных элементов. Издательство Томского политехнического университета, 2008. 127–138 с.

12. *Готовцев П.М., Воробьёв В.В., Мигалёв А.С., Бадранова Г.У., Горин К.В., А.Н. Решетилов, Р.Г. Васильев.* Биоэнергетика для автономных роботов. Перспективные решения и современное состояние. // Вестник биотехнологий и физико-химической биологии имени Ю.А. Овчинникова. 2015. Т. 11, № 2. С. 49–58.

13. *Kanwal A., Wang S.C., Ying Y., Cohen R., Lakshmanan S., Patlolla A., Iqbal Z., Thomas G.A., Farrow R.C.* Substantial power density from a discrete nano-scalable biofuel cell // *Electrochem. commun.* 2014. Т. 39. С. 37–40. DOI: 10.1016/j.elecom.2013.12.010.

14. *Du Z., Li H., Gu T.* A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy // *Biotechnol. Adv.* 2007. Т. 25, № 5. С. 464–482. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.05.004.

15. *Rosenbaum M.A., Franks A.E.* Microbial catalysis in bioelectrochemical technologies: status quo, challenges and perspectives // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014. Т. 98. С. 509–518. DOI: 10.1007/s00253-013-5396-6.

16. *Elouarzaki K., Haddad R., Holzinger M., Goff A. Le, Thery J., Cosnier S.* MWCNT-supported phthalocyanine cobalt as air-breathing cathodic catalyst in glucose/O₂ fuel cells // *J. Power Sources.* 2014. Т. 255. С. 24–28. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.109.

17. *Подиновский В.В., Потанов М.А.* Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra // *Математические методы и алгоритмы решения задач бизнес-информатики.* 2013. Т. 25, № 3. С. 41–48.

18. *Barca J.C., Sekercioglu Y.A.* Swarm robotics reviewed // *Robotica.* 2013. Т. 31, № 3. С. 345–359. DOI: 10.1017/S026357471200032X.

19. *Kernbach S.* Collective Energy Foraging of Robot Swarms and Robot Organisms // *Arxiv Prepr. arXiv1111.0873.* 2011.

20. *Sindi Y., Winfield, Melhuish S.* A feasibility study for energy autonomy in multi robot search

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY (REN21), 2016. 272 P.

8. *Mathias*. Solar Cell Efficiency World Record Set By Sharp – 44.4% [Electronic resource]. 2013. Available at: <http://cleantechnica.com/2013/06/23/solar-cell-efficiency-world-record-set-by-sharp-44-4>.

9. *Schultz, O., A. Mette, R. Preu, Glunz S.W.* Silicon solar cells with screen-printed front side metallization exceeding 19% efficiency // 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 2007. Pp. 980–983.

10. *Seed Studio*. «1w Solar Panel 80*100» [Electronic resource]. 2010.

11. *Krivobokov V.P., Soguchov N.S., Solov'ev A.A.* Elektrokimiya toplivnykh elementov. Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2008. Pp. 127-138. (in Russ.).

12. *Gotovtsev P.M., Vorob'ev V.V., Migalev A.S., Badranova G.U., Gorin K.V., A.N. Reshetilov, R.G. Vasilov.* Bioenergetika dlya avtonomnykh robotov. Perspektivnye resheniya i sovremennoe sostoyanie. // *Vestnik biotekhnologiy i fiziko-khimicheskoy biologii imeni Yu.A. Ovchinnikova.* 2015. Vol. 11, № 2. Pp. 49–58. (in Russ.).

13. *Kanwal A., Wang S.C., Ying Y., Cohen R., Lakshmanan S., Patlolla A., Iqbal Z., Thomas G.A., Farrow R.C.* Substantial power density from a discrete nano-scalable biofuel cell // *Electrochem. commun.* 2014. Vol. 39. Pp. 37–40. DOI: 10.1016/j.elecom.2013.12.010.

14. *Du Z., Li H., Gu T.* A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy // *Biotechnol. Adv.* 2007. Vol. 25, № 5. Pp. 464–482. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2007.05.004.

15. *Rosenbaum M.A., Franks A.E.* Microbial catalysis in bioelectrochemical technologies: status quo, challenges and perspectives // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014. Vol. 98. S. 509–518. DOI: 10.1007/s00253-013-5396-6.

16. *Elouarzaki K., Haddad R., Holzinger M., Goff A. Le, Thery J., Cosnier S.* MWCNT-supported phthalocyanine cobalt as air-breathing cathodic catalyst in glucose/O₂ fuel cells // *J. Power Sources.* 2014. Vol. 255. Pp. 24–28. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.109.

17. *Podinovskiy V.V., Potapov M.A.* Metod vzveshennoy summy kriteriev v analize mnogokriterial'nykh resheniy: pro et contra // *Matematicheskie metody i algoritmy resheniya zadach biznes-informatiki.* 2013. Vol. 25, № 3. Pp. 41–48. (in Russ.).

18. *Barca J.C., Sekercioglu Y.A.* Swarm robotics reviewed // *Robotica.* 2013. Vol. 31, № 3. Pp. 345–359. DOI: 10.1017/S026357471200032X.

19. *Kernbach S.* Collective Energy Foraging of Robot Swarms and Robot Organisms // *Arxiv Prepr. arXiv1111.0873.* 2011.

20. *Sindi Y., Winfield, Melhuish S.* A feasibility study for energy autonomy in multi robot search

and rescue operations // Advances in Mobile Robotics: Proceedings of the Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Coimbra: World Scientific Publishing Co, 2008. С. 1146–1153. DOI: 10.1142/9789812835772_0137.

21. *Карпов В.Э.* Модели социального поведения в групповой робототехнике // Управление большими системами. 2016. № 59. С. 165–232.

22. *Humza Qadir R.* Self-Sufficiency of an Autonomous Self-Reconfigurable Modular Robotic Organism. Universitat des Saarlandes, 2013.

23. *Dai H.* Adaptive Control in Swarm Robotic Systems // Hilltop Rev. 2009. Т. 3, № 1.

24. *Raja H., Scholz O.* A Case Study on Self-Sufficiency of Individual Robotic Modules in an Arena With Limited Energy Resources // ADAPTIVE 2011: The Third International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications. Rome, 2011. С. 29–35.

25. *Ровбо М.А.* Распределение ролей в гетерогенном муравьино-подобном коллективе // Пятнадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2016). Смоленск, 2016. Т. 2. С. 363–371.

26. *North M.J., Collier N.T., Ozik J., Tatara E.R., Macal C.M., Bragen M., Sydelko P.* Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony // Complex Adapt. Syst. Model. Springer Berlin Heidelberg, 2013. Т. 1, № 1. С. 1–26. DOI: 10.1186/2194-3206-1-3.

and rescue operations // Advances in Mobile Robotics: Proceedings of the Eleventh International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Coimbra: World Scientific Publishing Co, 2008. Pp. 1146–1153. DOI: 10.1142/9789812835772_0137.

21. *Karpov V.E.* Modeli sotsial'nogo povedeniya v gruppovoy robototekhnike // Upravlenie bol'shimi sistemami. 2016. № 59. Pp. 165–232. (in Russ.).

22. *Humza Qadir R.* Self-Sufficiency of an Autonomous Self-Reconfigurable Modular Robotic Organism. Universitat des Saarlandes, 2013.

23. *Dai H.* Adaptive Control in Swarm Robotic Systems // Hilltop Rev. 2009. Vol. 3, № 1.

24. *Raja H., Scholz O.* A Case Study on Self-Sufficiency of Individual Robotic Modules in an Arena With Limited Energy Resources // ADAPTIVE 2011: The Third International Conference on Adaptive and Self-Adaptive Systems and Applications. Rome, 2011. Pp. 29–35.

25. *Rovbo M.A.* Raspredelenie roley v geterogennom murav'ino-podobnom kollektive // Pyatnadsataya natsional'naya konferentsiya po iskusstvennomu intellektu s mezhdunarodnym uchastiem (KII-2016). Smolensk, 2016. Vol. 2. Pp. 363–371. (in Russ.).

26. *North M.J., Collier N.T., Ozik J., Tatara E.R., Macal C.M., Bragen M., Sydelko P.* Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony // Complex Adapt. Syst. Model. Springer Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 1, № 1. Pp. 1–26. DOI: 10.1186/2194-3206-1-3.

Сведения об авторах

Максим Александрович Ровбо

Инженер-исследователь

*Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», Москва, Россия
Эл. почта: rovboma@gmail.com*

Александр Александрович Мальшев

Инженер-исследователь

*Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт», Москва, Россия
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия
Эл. почта: a.san.malyshev@mail.ru*

Information about the authors

Maxim A. Rovbo

Research-engineer

*National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russia
E-mail: rovboma@gmail.com*

Aleksandr A. Malyshev

Research-engineer

*National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russia
National Research University Higher School of
Economics, Moscow, Russia
E-mail: a.san.malyshev@mail.ru*