

Т. М. Волосатова, канд. техн. наук, доц., tamaravol@gmail.com,
МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва,
А. В. Козов, инженер, alexey.kozov@gmail.com, **А. А. Тачков**, канд. техн. наук,
нач. отдела "Автоматизированные транспортные системы", tachkov@bmstu.ru,
НУЦ "Робототехника", МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва

Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования

Исследованы особенности процесса проектирования системы управления группой мобильных робототехнических комплексов, действующих в недетерминированной изменяющейся среде. Рассмотрен пример использования группы роботов для тушения пожара на объекте нефтегазового комплекса. Проведен анализ свойств системы группового управления, показано, что подобную систему необходимо рассматривать как динамически реконфигурируемую иерархическую дискретно-событийную систему, распределенную в пространстве. Отмеченные свойства рассмотрены с точки зрения задачи проектирования и реализации системы группового управления. Указаны особенности системы группового управления как объекта проектирования, отмечена возможность вертикальной и горизонтальной декомпозиции задачи проектирования, представлены методы синтеза и существующие программные инструменты. Проведенный анализ выявил необходимость автоматизации процесса проектирования программно-алгоритмического обеспечения систем группового управления. Описаны проектные процедуры синтеза и возможности их упрощения с помощью таких методов программной инженерии, как формальная верификация программного обеспечения и предметно-ориентированные языки. Сформулированы задачи специализированной системы автоматизированного проектирования программно-алгоритмического обеспечения системы группового управления мобильными робототехническими комплексами. Указаны направления развития данной работы.

Ключевые слова: система управления, групповое управление, распределенная система, дискретно-событийная система, динамическая реконфигурация, программно-алгоритмическое обеспечение, мобильный робот, автоматизация проектирования

Введение

Мобильные робототехнические комплексы (МРТК) находят сегодня практическое применение в областях, связанных с повышенной опасностью для жизни человека. МРТК активно используются при тушении пожаров, ликвидации последствий природных и техногенных катастроф, в аэрокосмической и военной областях. Расширение тактических возможностей робототехнических комплексов возможно путем объединения нескольких МРТК (автономных агентов) для совместной работы в группе [1]. Применение группы роботов, особенно в недетерминированной изменяющейся среде, существенно повышает предъявляемые к системе управления требования. Система группового управления (СГУ) должна не только обеспечивать согласование действий роботов для выпол-

нения задачи с требуемой эффективностью, но и поддерживать взаимодействие с человеком-оператором, осуществляющим контроль действий группы, а также своевременно реагировать на изменения окружающей обстановки.

Несмотря на имеющийся сегодня обширный методологический задел в области группового управления практическое применение методов и алгоритмов существенно ограничено из-за сложности описания группы МРТК как объекта управления, а СГУ — как объекта проектирования. Различным подходам к проектированию СГУ посвящено большое число работ (например, [2—5]), в которых, однако, почти не затронуты вопросы автоматизации предлагаемых проектных процедур. Актуальной научной задачей является анализ свойств СГУ как объекта проектирования и особенностей процесса разработки подобных систем для формализа-

ции задач автоматизации проектирования СГУ. Данная статья развивает положения работы [6], в которой были кратко изложены некоторые аспекты указанной научной задачи.

Рассмотрим ситуацию применения гетерогенной группы МРТК в недетерминированной изменяющейся среде, например, при ликвидации пожара на объекте нефтегазового комплекса (в резервуарном парке). Действия гетерогенной группы МРТК следует рассматривать как упорядоченную последовательность взаимосвязанных действий, направленных на достижение поставленной цели (локализации и ликвидации очага пожара), — *операцию* [7]. Ресурсами операции являются функциональные возможности отдельных МРТК. Человек-оператор организует *групповую операцию*, комбинируя заранее заданные *групповые действия* (движение подгруппы по траектории, выход на рубеж) с помощью специального программного обеспечения, основанного на возможностях геоинформационной системы [8]. На рис. 1 (см вторую сторону обложки) представлен пример групповой операции: МРТК группы следуют со стартовой позиции 1 по траектории 2 до рубежа 3, где они должны образовать две подгруппы, проследовать по траекториям 4, 5 и на рубежах 6, 7 приступить к тушению пожара. Определяющая групповую операцию последовательность действий должна быть привязана не только к координатам места выполнения, но и ко времени, поэтому ее можно представить в виде сетевого графика.

В рамках рассмотренного примера введем следующие ограничения: все возможные групповые действия должны быть определены на этапе проектирования СГУ, а каждая подгруппа в любой момент времени может выполнять только одно групповое действие. Групповое действие представляет собой комбинацию *индивидуальных действий* МРТК, которые, в свою очередь, состоят из согласованных действий различных подсистем робота. Реализация составляющих операцию действий в рамках СГУ происходит путем решения информационно-расчетных задач (ИРЗ): обработки сигналов сенсорных систем, передачи и обработки управляющих команд, запуска и прерывания других ИРЗ.

Свойства системы группового управления

Выделим основные иерархические уровни СГУ по их функциональному назначению (рис. 2). Верхний уровень СГУ реализует функ-

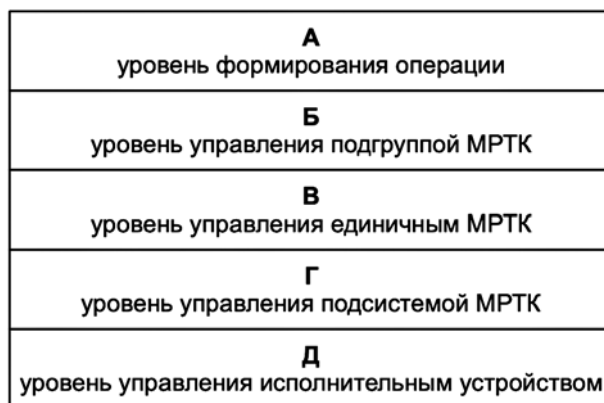


Рис. 2. Иерархия уровней системы группового управления

ции приема и разбора задачи групповой операции для трансляции ее нижележащим уровням, контроля выполнения операции и оперативного, возможно интерактивного, взаимодействия с человеком-оператором. Обратим внимание, что данный уровень не включает задачи взаимодействия с отдельным МРТК группы. Следующий уровень осуществляет контроль выполнения групповых действий, управление созданием и разделением подгрупп при выполнении операции, а также распределением индивидуальных действий между участниками подгруппы. Уровень управления единичным МРТК реализует функции контроля выполнения индивидуальных действий и отслеживания состояния МРТК. Системы управления подсистемами МРТК и его исполнительными устройствами соответствуют нижним уровням СГУ. В настоящее время среди специалистов в области робототехники отсутствует устоявшаяся терминология для обозначения каждого из уровней. В данной работе использованы следующие обозначения (рис. 2): уровень формирования операции (А), уровень управления подгруппой (Б), уровень управления единичным роботом (В), уровень управления подсистемой МРТК (Г), уровень управления исполнительным устройством (Д). Системы управления на всех перечисленных уровнях, кроме нижних, являются системами логического управления, реализующими закладываемые проектантами СГУ алгоритмы работы.

Подгруппа МРТК, соответствующая объекту управления на уровне Б, содержит от 1 до N роботов, где N — общее число МРТК в группе. Такой объект управления, в некотором смысле виртуальный, возникает при выполнении групповой операции. В процессе выполнения он может изменять свою структуру (число и тип

роботов в подгруппе, связи между ними), а после завершения операции прекращает свое существование. Введение этого уровня позволяет упростить задачу управления всей группой: состояние подгруппы заменяет параллельную композицию состояний роботов подгруппы. Система управления уровня А оперирует системой подгрупп ("группой подгрупп"), которая имеет существенно меньшую размерность по сравнению с системой всех МРТК группы. Подобная вертикальная декомпозиция СГУ соответствует способу формирования операции из отдельных подзадач (движение заданным строем, разведка в некоторой области и т.п.) вместо непосредственного управления отдельными роботами, что позволяет упростить работу человека-оператора группы и снизить психофизическую нагрузку [8, 9]. Выделение подгрупп как отдельных объектов управления соответствует принципу иерархической многоуровневой организации системы. Каждый уровень предоставляет вышестоящему набор сервисов и использует сервисы нижележащего, а коммуникация осуществляется по интерфейсам межуровневого взаимодействия между соседними в иерархическом плане уровнями [10].

При управлении группой МРТК (прежде всего, специального назначения) к каждому уровню СГУ и к системе в целом предъявляются повышенные требования по быстродействию, надежности, отказоустойчивости, живучести и безопасности. Система должна функционировать и обеспечить выполнение поставленных целей в условиях выхода из строя членов группы, нарушения работы каналов связи или активного противодействия. Цена ошибки СГУ может быть особенно высока при управлении группой МРТК среднего и тяжелого классов, действующих в условиях, представляющих опасность жизни человека.

Для управления группой роботов (уровни А, Б на рис. 2) предложено большое число подходов: коллективное, стайное, сетевое управление, мультиагентный подход, применение нейронных сетей и нечеткой логики [2, 11–13]. С точки зрения задач синхронизации действий отдельных подгрупп и взаимодействия с человеком-оператором группу МРТК можно рассматривать как дискретно-событийную систему. Процесс функционирования такой системы представляет собой последовательность событий, вызывающих изменение состояния объекта управления. Источниками событий могут быть объект управления, СГУ, внешняя среда или надсистема, а в промежутке между двумя после-

довательно возникшими событиями состояние системы считается неизменным [14].

Существующие подходы к управлению дискретно-событийными системами используют представление поведения системы в виде сетей Петри различных видов (временные, ингибиторные, цветные и др.) или сводимых к ним моделей. Поэтому целесообразно использовать сводимые к сетям Петри модели, в частности, конечные автоматы и конечноавтоматные сети, для задания требуемого поведения объекта управления (формальной спецификации K). В зависимости от рассматриваемого иерархического уровня СГУ спецификация может быть получена как результат формализации групповой операции, группового или индивидуального действия. На уровне Б подобная формализация должна включать протоколы обмена информацией между членами подгруппы и компонентами СГУ, необходимые для формирования внутреннего представления МРТК о внешней среде [15]. Отметим, что спецификация задает формальные требования к результату функционирования системы, а их реализацию обеспечивает система управления.

Имеющее широкое распространение супервизорное управление [16] рассматривает объект управления как генератор G некоторого формального языка $L(G)$, а спецификацию K — как подмножество этого формального языка $K \subseteq L(G)$. Алфавит $L(G)$ составляет множество E событий системы, разбитое на два непересекающихся подмножества: подмножество неуправляемых событий E_{uc} и подмножество управляемых событий E_c . Задана модель ничем не ограниченного объекта управления G и спецификация K как ограничения на его поведение. Супервизор S встроен в контур обратной связи по определенным правилам [17]. Он всегда допускает события из множества E_{uc} и может допускать или не допускать (блокировать) события из множества E_c так, чтобы поведение системы из супервизора и объекта управления удовлетворяло бы K . Модель объекта управления и спецификация могут быть заданы в виде детерминированных конечных автоматов или сетей Петри.

Однако для применения данного подхода в разработке верхних уровней СГУ МРТК необходимо учитывать ряд особенностей. Недетерминированность внешней среды означает, что спецификация должна включать различные варианты поведения в зависимости от ситуации и, возможно, изменяться непосредственно во время выполнения групповой

операции. Структура и функциональные возможности объекта управления в процессе выполнения групповой операции также могут изменяться, что означает изменение языка $L(G)$. Это происходит, например, при добавлении нового робота в группу, объединении или выделении новых подгрупп. Таким образом, при применении супервизорного управления следует учитывать, что группа МРТК как объект управления обладает переменной структурой.

Наложим на объект управления переменной структуры следующее ограничение [18]. Изменение внутренней структуры в процессе функционирования объекта управления происходит за время t_i^R , значительно меньшее времени t_i^A и t_{i+1}^A выполнения основных действий i и $i + 1$ (групповых действий на уровне **A**, индивидуальных действий на уровне **B**), между которыми произошло изменение структуры

$$t_i^R \ll \min(t_i^A, t_{i+1}^A), i = 1, 2, \dots, m - 1,$$

где $m \geq 2$ — число действий, выполняемых объектом управления.

Рассмотрим ситуацию изменения структуры объекта управления на уровне **B**. Синтез алгоритма работы системы управления этого уровня происходит по формальной спецификации K группового действия и модели объекта управления (подгруппы МРТК) $L(G)$. Если изменение структуры объекта управления происходит *во время* выполнения группового действия, то для соблюдения спецификации K необходимо изменение модели $L(G)$ и алгоритма работы системы управления. Алгоритм работы представляет собой последовательность ИРЗ — проводимых компьютером операций над данными (изменение, получение, отправка членам группы) и может быть представлен вычислительным графом $\langle A, C \rangle$. Множество $A = \{a_i\}$, $i = 1, 2, \dots, |A|$, где $|A|$ — мощность множества A , составляют вершины графа, которые соответствуют операторам алгоритма, связанным с выполнением индивидуальных действий. Множество дуг $C = \{c_{i,j}\}$, $i = 1, 2, \dots, |A|$, $j = 1, 2, \dots, |A|$, $i \neq j$, задает информационные связи между операторами алгоритма. Неравенство $c_{i,j} \neq 0$ означает наличие информационной связи между операторами a_i и a_j , $c_{i,j} = 0$ — ее отсутствие. Так, добавление нового МРТК в подгруппу во время выполнения некоторого группового действия должно быть отражено в модели объекта управления и потребует изменения системы управления: в вычислительный граф

алгоритма ее работы для соблюдения спецификации будут добавлены новые операторы и информационные связи между ними. Таким образом, должна быть проведена *динамическая реконфигурация* системы управления, что соответствует принципу адаптивного управления.

Изменение структуры объекта управления на уровне **A** во время выполнения операции, например создание новой подгруппы, аналогичным образом ведет к необходимости динамической реконфигурации системы управления этого уровня. Однако стоит заметить, что спецификация на уровне **A** может содержать требования по распределению ресурсов. В таком случае СГУ должна решать задачи управления ресурсами, а дуги графа групповой операции приобретают смысл ресурсных связей между составляющими операцией групповыми действиями.

Обеспечить соответствие модели объекту управления при изменении его структуры возможно путем параметризации структуры, формирования метамодели (т.е. включения в модель предполагаемых изменений) или коррекции модели экспертом — человеком-оператором, автоматизированной или автоматической системой. Параметризация структуры модели (например, числа МРТК в группе) может быть эффективно применена в случаях, когда обновление значений параметров позволит отразить изменения структуры объекта управления. Включение в модель различных вариантов структуры объекта управления ведет к существенному усложнению системы управления, использующей такую модель, и к экспоненциальному росту сложности задачи ее синтеза. Коррекция модели экспертом непосредственно в процессе функционирования требует решения проблем оперативного доведения изменений до системы управления соответствующего уровня. Аналогичные подходы могут быть использованы для коррекции спецификации K при изменении внешней среды (условий применения группы).

Таким образом, систему управления группой МРТК, учитывая перечисленные особенности, следует рассматривать как динамически реконфигурируемую иерархическую дискретно-событийную систему, распределенную в пространстве.

Проектирование системы группового управления

При проектировании СГУ необходимо учитывать, что группа МРТК представляет со-

бой целеустремленную техническую систему (ЦУТС). Задача СГУ состоит в управлении группой таким образом, чтобы достичь заданных целей операции с учетом ограничений по ресурсам и времени. Подсистемы различных иерархических уровней выступают в качестве обеспечивающих ЦУТС [7]. При проектировании таких систем управления необходимо исходить из того, что их основная задача — обеспечение функционирования соответствующих уровней с требуемыми показателями качества.

Рассмотренные ранее особенности верхних уровней СГУ, связанные с изменением вычислительного графа алгоритма работы, указывают на возможность использования некоторых положений теории реконфигурируемых распределенных вычислительных систем (многопроцессорных вычислительных систем на основе реконфигурируемой элементной базы) [18–20]. Заметим, в случае управления группой МРТК компоненты системы не только распределены в пространстве, но и подвижны (мобильны). Задачу проектирования такой системы на каждом уровне иерархии следует разбивать на подзадачи, связанные с разработкой отдельных компонентов (модулей) и интерфейсов их взаимодействия, реализуя тем самым горизонтальную декомпозицию СГУ. Модули системы должны функционировать под управлением разных операционных систем на различных аппаратных платформах: встраиваемых микропроцессорных системах, бортовых вычислителях МРТК, компьютерах пункта управления и автоматизированного рабочего места человека-оператора. Следствием этого является требование кроссплатформенности и портируемости программных компонентов СГУ.

Разработка подсистем разных уровней ведется в общем случае разными проектантами с использованием различного инструментария, поэтому одна из задач проектирования СГУ — обеспечение согласованности и возможности взаимодействия подсистем между собой, с над- и подсистемами. Поскольку СГУ является распределенной информационной системой, взаимодействие ее компонентов должно происходить согласно заданному протоколу или иному формальному описанию интерфейса компонентов системы. Один из подходов к проектированию подобных систем представлен в работе [10].

Теория супервизорного управления позволяет провести автоматический синтез системы логического управления по спецификации поведения K и модели объекта управления $L(G)$ [21]. Супервизорное управление применяют при

проектировании систем управления группами промышленных роботов, где объект управления неизменен, а спецификация поведения системы задана технологическим процессом. Принципиальное отличие разработки рассматриваемого в настоящей работе класса СГУ состоит в том, что на этапе проектирования должен быть разработан набор правил преобразования $K(X)$ некоторого множества аргументов X , таких как, например, число роботов в подгруппе или координаты точек траектории движения. Спецификация K будет результатом применения $K(X)$ к конкретным значениям аргументов, которые будут получены только после постановки цели операции и могут изменяться в процессе ее выполнения. Обратим внимание, что в рамках описанной иерархической системы модель $L(G)$ может быть сформирована на основе спецификации поведения нижележащего уровня и множества команд вышестоящего уровня. Следовательно, разработка правил и алгоритмов формирования спецификаций поведения является одной из ключевых задач проектирования верхних уровней СГУ.

Одним из основных факторов, ограничивающих практическое применение теории супервизорного управления, является проблема размерности пространства состояний системы [22, 23]. Для верхних уровней СГУ эта проблема имеет наибольшую актуальность. При проектировании этих уровней необходимо принимать во внимание изменения как структуры модели объекта управления, так и спецификации поведения, что ведет к созданию метамodelей большой размерности. Для борьбы с проблемой размерности ("взрыва состояний") используют методы декомпозиции системы, например, методы модульного синтеза супервизора и структурирования событий [24].

Существующие инструменты предоставляют возможности дискретно-событийного моделирования работы модулей верхних уровней СГУ [25]. Однако следует подчеркнуть важность выбора инструментов моделирования, поскольку имеющиеся у различных инструментов ограничения могут оказать влияние на характеристики полученных с их помощью моделей. Наиболее широкий выбор существует среди инструментов моделирования, автоматизации проектирования, программной и аппаратной реализации модулей нижних уровней СГУ. При разработке с использованием таких инструментов, как *MATLAB-Simulink* или *LabVIEW*, проектант имеет возможность не только разрабатывать и верифицировать раз-

личные алгоритмы и модели, но и автоматически генерировать реализующий соответствующую функциональность программный код для встраиваемых систем [26]. Такая возможность позволяет существенно ускорить процесс разработки компонентов систем управления нижних уровней. Для упрощения разработки компонентов среднего и верхнего уровней часто применяют предоставляемые средой *Robot Operating System (ROS)* инструментарий, интерфейсы взаимодействия, библиотеки базовых блоков и готовых решений. Для автоматизации процесса тестирования и отладки *ROS*-приложений могут быть использованы специальные стенды [27]. Таким образом, существуют инструменты как для моделирования компонентов верхних уровней СГУ, так и для их реализации. Однако из-за отсутствия возможности автоматического преобразования разработанной модели в формальное описание, комплект проектной документации и удовлетворяющую поставленным требованиям систему управления процесс подобного преобразования при проектировании компонентов верхних уровней СГУ представляет наибольшую сложность.

Задачу разработки верхних уровней СГУ с учетом указанных особенностей необходимо рассматривать как задачу проектирования иерархической распределенной кроссплатформенной модульной системы. Ключевое значение имеет проблема перевода замысла проектанта в формальную спецификацию поведения компонентов СГУ, т.е. разработка *программно-алгоритмического обеспечения* этой системы. Снижение очевидной сложности и упрощение процессов разработки спецификаций, синтеза и моделирования компонентов СГУ возможно путем применения подходов инженерии программного обеспечения и специализированной системы автоматизированного проектирования (САПР).

Автоматизация проектных процедур

Обеспечение качества и повышение надежности разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения возможно благодаря применению в САПР формальных методов валидации и верификации. Формальная верификация программного обеспечения, например с помощью проверки моделей (англ. *model checking*), позволяет доказать, что программная система не содержит некоторых ошибок, удов-

летворяет заданным требованиям и обладает определенными свойствами [28].

Предметно-ориентированные языки (англ. *DSL, domain-specific language*) позволяют существенно упростить и ускорить разработку за счет абстрагирования от реализации и высокой декларативности [29]. Специальные *DLS*, в том числе визуальные, целесообразно применять для наиболее трудоемких задач работы со спецификациями поведения, поэтому САПР должна поддерживать набор специальных предметно-ориентированных языков и инструментов метапрограммирования.

Специализированная САПР верхних уровней СГУ должна обладать инструментами для работы с сетями Петри различных видов и сетями конечных автоматов. Другими необходимыми элементами являются подсистемы моделирования и синтеза. Отметим, что некоторые существующие инструменты моделирования общего назначения позволяют преобразовать разработанную с их помощью модель в программный код на языках высокого уровня, который может быть использован в действующей системе управления. Однако следует учитывать, что модели могут получать различные "артефакты" вследствие ограничений инструмента, поэтому автоматическое преобразование не всегда целесообразно, а ручное изменение полученного кода не всегда возможно. По этой причине разработку обычно выполняют итеративно в несколько этапов: разработка модели, ее тестирование и отладка, реализация системы управления согласно модели, тестирование и отладка реализованной системы, коррекция модели и итеративное повторение цикла разработки до получения результата с требуемыми параметрами. Альтернативой описанной проектной процедуре является применение теории супервизорного управления. После разработки спецификации поведения компонента системы, например в виде сети Петри, следует синтез супервизора и модели, описывающей супервизор и объект управления, для верификации. Верификация и всестороннее тестирование поведения модели позволяют сделать вывод о необходимости коррекции спецификации или о готовности синтезированного компонента системы к интеграции в СГУ. Одним из тестов для модулей верхних уровней СГУ должна быть проверка совместной работы, в том числе с имитацией нарушений работы каналов связи между модулями. Разработанная в НУЦ "Робототехника" МГТУ им. Н. Э. Баумана система *LOCOL* частично реализует описанный подход

[30]. Однако применение этого инструмента при разработке систем управления МРТК ограничено программно-аппаратными требованиями синтезированной системы.

На основе проведенного анализа перечислим задачи проектирования верхних уровней (А, Б, В) СГУ МРТК, упрощение которых возможно с помощью САПР:

- разработка спецификаций поведения и правил их формирования после постановки цели операции;
- обеспечение возможности изменения объекта управления или поставленной цели непосредственно в процессе ее выполнения;
- разработка протоколов межуровневого и межкомпонентного взаимодействия, обеспечение их согласованности и соблюдения различными модулями;
- учет в программно-алгоритмическом обеспечении возможного нарушения работы каналов связи при выполнении групповой операции;
- обеспечение заданных показателей качества программного обеспечения;
- синтез компонентов системы управления.

Комплексность и разнородность перечисленных задач, а также отсутствие готовых инструментов для их решения в рамках единой системы свидетельствуют о необходимости создания специализированной САПР программно-алгоритмического обеспечения СГУ.

Заключение

Актуальность проблем разработки систем управления группами МРТК связана со все более широким распространением и возрастающей сложностью систем данного класса. Анализ группы МРТК как объекта управления показывает, что сложность процесса разработки СГУ связана с такими свойствами системы, как иерархичность, наличие переменной структуры, высокие требуемые показатели качества функционирования, высокая размерность пространства состояний верхних уровней системы. Несмотря на имеющийся теоретический базис существует проблема перевода замысла проектанта в формальную спецификацию поведения компонентов СГУ. Особенности проектирования СГУ, низкий уровень автоматизации проектных процедур и отсутствие готовых инструментов указывают на объективную необходимость создания специализированной САПР программно-алго-

ритмического обеспечения СГУ МРТК. Проведенный в данной работе анализ позволил сформулировать задачи такой САПР и обозначить подходы к их решению. Развитие работы планируется в направлениях анализа и формализации ключевых проблем проектирования СГУ, а также разработки методов и программных средств автоматизации проектирования дискретно-событийных систем переменной структуры.

Список литературы

1. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 280 с.
2. **Белоглазов Д. А.** и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 305 с.
3. **Манько С. В., Диане С. А.К., Лохин В. М., Романов М. П.** Модели и программно-алгоритмическое обеспечение мультиагентных робототехнических систем // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. 1, № 3. С. 166—191.
4. **Mu B., Chen J., Shi Y., Chang Y.** Design and Implementation of Nonuniform Sampling Cooperative Control on a Group of Two-Wheeled Mobile Robots // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 64, N. 6. P. 5035—5044.
5. **Hu X., Zeigler B. P., Mittal S.** Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation // Simulation. 2005. Vol. 81, N. 2. P. 91—102.
6. **Козов А. В., Волосатова Т. М., Тачков А. А.** Направления автоматизации проектирования систем управления группами наземных робототехнических комплексов // Фундаментально-прикладные проблемы безопасности, живучести, надежности, устойчивости и эффективности систем. Елец, 2019. С. 335—339.
7. **Петухов Г. Б., Якунин В. И.** Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. М.: АСТ, 2006. 504 с.
8. **Максимов А. А., Тачков А. А., Малыхин А. Ю., Рудянов Н. А.** Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 7—8. С. 88—96.
9. **Лысенко И. В.** Оценивание эффективности функционирования человеко-машинных систем: вероятностный подход // Труды СПИИРАН. 2002. Т. 1, № 1. С. 49—64.
10. **Апраксин Ю. К.** Управление информационным взаимодействием в распределенных технических системах. Конечно-автоматный подход. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. 182 с.
11. **Щербатов И. А., Проталинский И. О., Проталинский О. М.** Управление группой роботов: компонентный подход // Информатика и системы управления. 2015. Т. 43, № 1. С. 93—104.
12. **Karpenko A. P., Leshchey I. A.** Nature-Inspired Algorithms for Global Optimization in Group Robotics Problems // Smart Electromechanical Systems: Group Interaction. Cham, 2019. P. 91—106.
13. **Hüttenrauch M., Šošić A., Neumann G.** Deep Reinforcement Learning for Swarm Systems // Journal of Machine Learning Research. 2019. Vol. 20, N. 54. P. 1—31.

14. **Wonham W. M., Cai K.** Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham: Springer, 2018. 502 p.

15. **Zeigler B. P.** Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems. Academic Press, 1990, 397 p.

16. **Wonham W. M., Cai K., Rudie K.** Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History // Annual Reviews in Control. 2018. Vol. 45. P. 250—256.

17. **Амбарцумян А. А.** Сетцентрическое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Вып. 30.1. С. 506—535.

18. **Филиппов А. К.** Теоретические основы проектирования динамически реконфигурируемых систем обработки информации: учебное пособие. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. 119 с.

19. **Каляев И. А., Левин И. И.** Высокопроизводительные модульно-наращиваемые многопроцессорные системы на основе реконфигурируемой элементной базы // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2007. Т. 8, № 2. С. 24—33.

20. **Карпенко А. П., Чернецов С. А.** Балансировка загрузки распределенной гетерогенной вычислительной системы средствами GRID при распараллеливании одного класса задач // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал. 2008. № 11. С. 1—10.

21. **Wonham W. M., Ramadge P. J.** Modular Supervisory Control of Discrete-Event Systems // Mathematics of Control, Signals and Systems. 1988. Vol. 1, N. 1. P. 13—30.

22. **Амбарцумян А. А., Томилин Е. Е.** Метод прямого синтеза супервизора для структурированной дискретно-динамической системы // Автоматика и телемеханика. 2010. № 8. С. 168—188.

23. **Zaytoon J., Riera B.** Synthesis and Implementation of Logic Controllers — A Review // Annual Reviews in Control. 2017. Vol. 43. P. 152—168.

24. **Амбарцумян А. А.** Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Автоматика и телемеханика. 2009. № 8. С. 156—176.

25. **Алексеев В. А., Яковлев Д. С., Тачков А. А.** Моделирование иерархической системы управления группой наземных робототехнических средств // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 4. С. 1—20.

26. **Krizan J., Ertl L., Bradac M., Jasansky M., Andreev A.** Automatic Code Generation from Matlab/Simulink for Critical Applications // 2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Toronto, 2014. P. 1—6.

27. **Тачков А. А., Вуколов А. Ю., Козов А. В.** Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу семейства "Эльбрус" // Программные продукты и системы. 2019. Т. 32, № 4. С. 655—664.

28. **Кларк Э. М., Грамберг О., Пелед Д.** Верификация моделей программ: Model checking. М.: МЦНМО, 2002. 416 с.

29. **Фаулер М.** Предметно-ориентированные языки программирования. М.: Вильямс, 2011. 572 с.

30. **Максимов А. А.** Один подход к построению конечно-автоматной управляющей сети // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2012. № 6. С. 14—29.

T. M. Volosatova, Ph.D., Associate Professor, e-mail: tamaravol@gmail.com,
CAD System Department, Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russian Federation,

A. V. Kozov, Engineer, e-mail: alexey.kozov@gmail.com,

A. A. Tachkov, Ph.D., Head of the Department "Automated transport systems", e-mail: tachkov@bmstu.ru
Science and Educational Center "Robotics" Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105037, Russian Federation

The Control System for a Group of Mobile Robots from the Perspectives of Automated Designing

This paper is devoted to the features of the design process of a control system for a group of mobile robots. We considered group of mobile robots operated in a non-deterministic changing environment. Firefighting operations in oil and gas complex are given as example of such group using. The features of the group control system are considered in paper. It is shown that the group control system has to be considered as a dynamically reconfigurable hierarchical discrete-event distributed system. These properties are analyzed in terms of designing and implementing a group control system. The features of a group control system as a designing object are described, as well as the possibility of vertical and horizontal decomposition of the design problem, Moreover, the synthesis methods and existing software tools are considered. The analysis revealed the need to automate the process of designing software and algorithms of group control systems. We considered the synthesis procedures and proposed opportunities to simplify them using such software engineering methods as a formal verification of software and domain-specific languages. The problems of specialized computer-aided design (CAD) system for software and algorithms of control system for group of mobile robots are formulated. Furthermore, the directions of future development are briefly outlined.

Keywords: control system, group control, distributed system, discrete-event system, dynamic reconfiguration, software and algorithms, mobile robot, design automation

DOI: 10.17587/it.26.274-282

References

1. **Kalyaev I. A., Gajduk A. R., Kapustyan S. G.** Models and algorithms of collective control in groups of robots, Moscow, FIZMATLIT, 2009, 280 p. (in Russian).
2. **Beloglazov D. A., Gajduk A. R., Kosenko E. Yu., Medvedev M. Yu., Pshihopov V. H., Solov'ev V. V., Titov A. E., Finaev V. I., Shapovalov I. O.** Group control of moving objects in uncertain environments, Moscow, FIZMATLIT, 2015, 305 p. (in Russian).
3. **Man'ko S. V., Diane S. A.K., Lohin V. M., Romanov M. P.** Models, software and algorithmic support of multi-agent robotic systems, *Vestnik MGTU MIREA*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 166–191 (in Russian).
4. **Mu B., Chen J., Shi Ya., Chang Ya.** Design and Implementation of Nonuniform Sampling Cooperative Control on a Group of Two-Wheeled Mobile Robots, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 64, no. 6, pp. 5035–5044.
5. **Hu X., Zeigler B. P., Mittal S.** Variable Structure in DEVS Component-Based Modeling and Simulation, *Simulation*, 2005, vol. 81, no. 2, p. 91–102.
6. **Kozov A. V., Volosatova T. M., Tachkov A. A.** Directions of automation of designing of control systems for mobile robot groups, *Fundamental'no-prikladnye problemy bezopasnosti, zhi-vuchesti, nadyozhnosti, ustojchivosti i effektivnosti sistem*, Elec, 2019, pp. 335–339 (in Russian).
7. **Petuhov G. B., Yakunin V. I.** Methodological foundations of external design of targeted processes and purposeful systems, Moscow, AST, 2006, 504 p. (in Russian).
8. **Maksimov A. A., Tachkov A. A., Malyhin A. Yu., Rudianov N. A.** An approach to formalization of mission plan for group of military unmanned vehicles, *Voprosy oboronnoj tekhniki*, 2017, no. 7–8, pp. 88–96 (in Russian).
9. **Lysenko I. V.** Assessing the effectiveness of the functioning of human-machine systems: a probabilistic approach, *Trudy SPIRAN*, 2002, vol. 1, no. 1, pp. 49–64 (in Russian).
10. **Apraksin Yu.K.** Control of information interaction in distributed technical systems. Finite state machine approach, Moscow, INFRA-M, 2017, 182 p. (in Russian).
11. **Shcherbatov I. A., Protalinskij I. O., Protalinski O. M.** Robot group control: a component approach, *Informatika i sistemy upravleniya*, 2015, vol. 43, no. 1, pp. 93–104 (in Russian).
12. **Karpenko A. P., Leshchev I. A.** Nature-Inspired Algorithms for Global Optimization in Group Robotics Problems, *Smart Electromechanical Systems: Group Interaction*, Cham, 2019, pp. 91–106.
13. **Hüttenrauch M., Šošić A., Neumann G.** Deep Reinforcement Learning for Swarm Systems, *Journal of Machine Learning Research*, 2019, vol. 20, no. 54, pp. 1–31.
14. **Wonham W. M., Cai K.** Supervisory Control of Discrete-Event Systems. Cham, Springer, 2018, 502 p.
15. **Zeigler B. P.** Object-Oriented Simulation with Hierarchical, Modular Models: Intelligent Agents and Endomorphic Systems, Academic Press, 1990, 397 p.
16. **Wonham W. M., Cai K., Rudie K.** Supervisory Control of Discrete-Event Systems: A Brief History, *Annual Reviews in Control*, 2018, vol. 45, pp. 250–256.
17. **Ambarcumyan A. A.** Network-Centric Control Based on Petri Nets in the Structured Discrete-Event System, *Automation and Remote Control*, 2012, vol. 73, no. 7, pp. 1227–1241.
18. **Filippov A. K.** The theoretical fundamental for the design of dynamically reconfigurable information processing systems, Vladimir, 2010, 119 p. (in Russian).
19. **Kalyaev I. A., Levin I. I.** High-performance modular-scalable multiprocessor systems based on reconfigurable element base, *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, vol. 8, no. 2, pp. 24–33 (in Russian).
20. **Karpenko A. P., Chernecov S. A.** Balancing the load of a distributed heterogeneous computing system using GRID by parallelizing one class of tasks, *Nauka i obrazovanie*, 2008, no. 11, pp. 1–10 (in Russian).
21. **Wonham W. M., Ramadge P. J.** Modular Supervisory Control of Discrete-Event Systems, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1988, vol. 1, no. 1, pp. 13–30.
22. **Ambartsumyan A. A., Tomilin E. E.** Supervisor Direct Synthesis Method for a Structured Discrete Dynamical System, *Automation and Remote Control*, 2010, vol. 71, no. 8, pp. 661–1679.
23. **Zaytoon J., Riera B.** Synthesis and Implementation of Logic Controllers — A Review, *Annual Reviews in Control*, 2017, vol. 43, pp. 152–168.
24. **Ambartsumyan A. A.** Supervisory Control of the Structured Dynamic Discrete-Event Systems, *Automation and Remote Control*, 2009, vol. 70, no. 8, pp. 156–176.
25. **Alekseev V. A., Yakovlev D. S., Tachkov A. A.** Modeling a hierarchical control system for a group of ground-based robots, *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii*, 2018, no. 4, pp. 1–20 (in Russian).
26. **Krizan J., Ertl L., Bradac M., Jasansky M., Andreev A.** Automatic Code Generation from Matlab/Simulink for Critical Applications, *2014 IEEE 27th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, Toronto, 2014, pp. 1–6.
27. **Tachkov A. A., Vukolov A.Yu., Kozov A. V.** Peculiarities of porting the Robot Operating System framework onto Elbrus platform, *Software & Systems*, 2019, vol. 32, no. 4, pp. 655–664 (in Russian).
28. **Clarke Jr. E. M., Grumberg, O., Kroening, D., Peled, D.** Model checking, MIT press, 1999, 330 p.
29. **Fowler M.** Domain-specific languages, Pearson Education, 2010, 610 p.
30. **Maksimov A. A.** One approach to building a finite-state machine control network // *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman*, 2012, no. 6, pp. 14–28 (in Russian).

Рисунок к статье Т. М. Волосатовой, А. В. Козова, А. А. Тачкова
«СИСТЕМА ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ
С ПОЗИЦИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ»

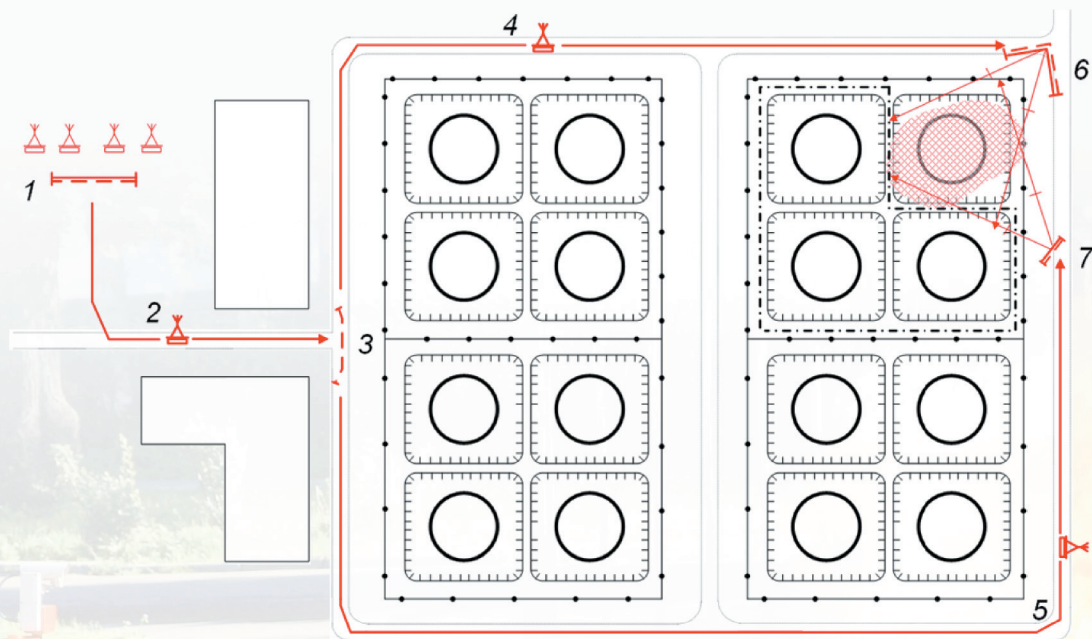


Рис. 1. Групповая операция по тушению пожара в резервуарном парке:

1 – стартовая позиция роботов; *2, 4, 5* – траектории движения подгрупп;
3 – промежуточный рубеж для разделения на две подгруппы; *6, 7* – рубежи тушения