

# ПРОЕКТНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА ДИСКРЕТНО-СОБЫТИЙНЫХ СИСТЕМ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ

**А.В. Козов**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана*

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

E-mail: alexey.kozov@gmail.com

**Ключевые слова:** мобильный робот, дискретно-событийная система, система группового управления, проектные процедуры, автоматизация проектирования, маршрут проектирования.

**Аннотация:** Работа представляет проектные процедуры, обеспечивающие автоматизированный синтез дискретно-событийных систем группового управления для мобильных роботов. Указаны ограничения известных моделей и методов проектирования таких систем. Представлен маршрут проектирования, включающий следующие проектные процедуры: синтез компьютерной модели объекта управления, спецификация поведения объекта управления, синтез управления дискретно-событийной системой, анализ дискретно-событийной системы группового управления. Для перечисленных процедур приведены исходные данные, их результат, особенности и основные шаги. Представленные проектные процедуры используют компьютерную модель объекта проектирования и являются основной для создания специализированной системы автоматизированного проектирования.

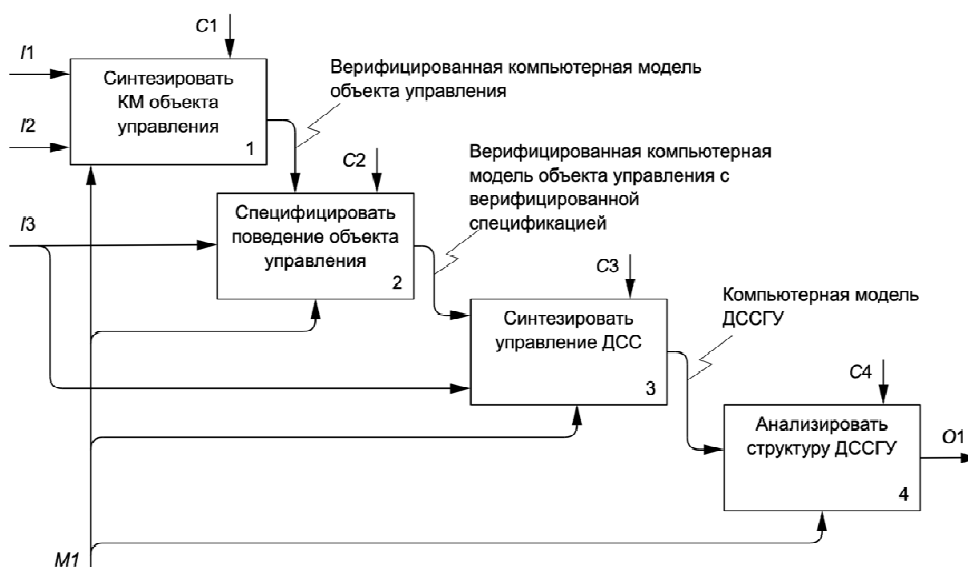
## 1. Введение

Автономные мобильные роботы (МР) имеют практическое применение для тушения пожаров, ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, гуманитарного разминирования и в иных областях, связанных с высоким риском для жизни человека [1, 2]. Объединение МР в группу, управляемую единой системой группового управления (СГУ), позволяет существенно повысить эффективность их применения. Контроль действий группы осуществляет человек-оператор, который ставит задачу (формирует план *групповой операции*), например, при помощи условных знаков геоинформационной системы на цифровой карте местности [3]. СГУ получает поставленную таким способом задачу, обеспечивает координацию действий и синхронизацию состояний МР в группе для достижения целей групповой операции с заданными показателями эффективности.

Верхние уровни иерархической СГУ отвечают за выполнение индивидуальных действий роботами, групповых действий подгруппами и групповой операции в целом. Для этих уровней характерно дискретно-событийное представление, что позволяет выделять их как дискретно-событийную систему группового управления (ДССГУ). Создание ДССГУ связано с проблемами «проклятия размерности» (экспоненциальным увеличением размерности пространства состояний при добавлении нового элемента),

многократным выполнением трудоемких проектных процедур и ограничениями методологического обеспечения процесса проектирования [4, 5]. Известные математические модели ДССГУ, используемые при проектировании, имеют высокий уровень абстракции и не учитывают, например, ограничений каналов связи в группе. Известные методы проектирования ДССГУ не рассматривают задачу формализации замысла проектировщика о требуемом поведении объекта управления (т.е. группы роботов) и не предполагают автоматизацию решения этой задачи. На устранение перечисленных ограничений направлена предложенная автором *методика автоматизированного проектирования ДССГУ*.

Маршрут проектирования методики состоит из четырех проектных процедур: синтез компьютерной модели объекта управления (группы, отдельного МР или его подсистемы), спецификация поведения объекта управления, синтез управления дискретно-событийной системой (ДСС), анализ ДССГУ (рис. 1).



**Рис. 1.** Маршрут проектирования ДССГУ (в нотации IDEF0): КМ – компьютерная модель;  $I1$  – компонентные автоматы;  $I2$  – входные и выходные данные структурных элементов;  $I3$  – требования к поведению объекта управления;  $C1$  – методы верификации модели объекта управления;  $C2$  – методы верификации спецификации;  $C3$  – методы синтеза управления ДСС;  $C4$  – методы анализа ДССГУ;  $O1$  – компьютерная модель супервизора и технические требования ДССГУ;  $M1$  – проектировщик.

Методика автоматизированного проектирования ДССГУ использует математическую и компьютерную модели объекта проектирования [6,7]. Проектное решение, получаемое в результате практического применения методики, представляет собой компьютерную модель ДССГУ, включающую описание структуры и информационного взаимодействия структурных элементов системы управления, а также оценки требований к каналам связи и вычислительным ресурсам бортовых компьютеров группы МР.

Рассмотрим проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ в порядке их выполнения.

## 2. Синтез компьютерной модели объекта управления

Проектная процедура синтеза компьютерной модели объекта управления позволяет представить группу МР в виде элементов компьютерной модели ДССГУ.

Объект управления ДССГУ является параллельной композицией  $n$  компонентных автоматов,  $G = \langle G^1, G^2, \dots, G^n \rangle$ . Каждый компонентный автомат  $G^i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , описывает выполнение того или иного действия (например, групповое или индивидуальное действие МР).

Исходными данными процедуры являются описание надсистемы, МР, их подсистем и функциональных возможностей в виде дискретно-событийных моделей – автоматов или сетей Петри. Состояние автомата или позиция сети Петри моделирует структурный элемент проектируемой ДССГУ, отвечающий за выполнение объектом управления какого-либо действия. Для каждой исходной дискретно-событийной модели необходима информация о входных и выходных данных структурных элементов. Результатом процедуры является верифицированная компьютерная модель объекта управления заданного иерархического уровня ДССГУ.

Процедура состоит из четырех шагов.

- 1) Формирование математической модели  $i$ -го компонентного автомата по исходным данным проектной процедуры [6].
- 2) Формирование компьютерной модели  $i$ -го компонентного автомата на основе полученной математической модели [7].
- 3) Верификация компьютерной модели  $i$ -го компонентного автомата.
- 4) Формирование компьютерной модели объекта управления (группы МР) путем параллельной композиции разработанных на предыдущих шагах компонентных автоматов.

Шаги 1)-3) повторяются для каждой из исходных моделей. Для верификации используется проверка свойств сети Петри, лежащей в основе компьютерной модели.

### 3. Спецификация поведения объекта управления

Проектная процедура спецификации поведения объекта управления позволяет формализовать требования к поведению группы МР в терминах компьютерной модели для последующего синтеза дискретно-событийного управления.

Требуемое поведение объекта управления  $G$  определяет спецификация  $K$ . Спецификация задает последовательности событий, которые обеспечивают ту функциональность, для реализации которой предназначена проектируемая ДССГУ.

Исходными данными процедуры являются требования к поведению объекта управления заданного иерархического уровня и верифицированная компьютерная модель этого объекта управления. Результатом процедуры является верифицированная компьютерная модель объекта управления заданного иерархического уровня ДССГУ с верифицированной спецификацией.

Процедура состоит из трех шагов.

- 1) Анализ требований к поведению группы МР для выявления основной последовательности событий и ситуаций ее «ветвления», например, возникновение ошибок в процессе выполнения действий МР.
- 2) Добавление в компьютерную модель спецификации.
- 3) Верификация компьютерной модели спецификации при помощи алгоритма, предложенного А.А. Амбарцумяном [8].

В результате выполнения проектной процедуры спецификации поведения объекта управления формируется компьютерная модель, готовая к синтезу управления ДСС.

## 4. Синтез управления ДСС

Проектная процедура синтеза управления ДСС обеспечивает синтез управляющего компонента (*супервизора S*) для формирования компьютерной модели ДССГУ.

Управляющий компонент ДССГУ генерирует события в ответ на последовательности событий объекта управления так, чтобы его поведение под управлением супервизора (обозначается  $S/G$ ) соответствовало бы спецификации  $K$ .

Исходными данными процедуры является верифицированная компьютерная модель объекта управления заданного иерархического уровня с верифицированной спецификацией. Результатом процедуры является компьютерная модель ДССГУ с супервизором.

Процедура состоит из трех шагов.

- 1) Синтез управления (супервизора) ДСС по компьютерной модели объекта управления и спецификации.
- 2) Симуляция работы компьютерной модели ДССГУ для проверки соответствия требованиям.
- 3) Минимизация управляющего компонента (необязательный шаг).

Для синтеза дискретно-событийного управления предложена модификация известного метода домино [9, 10]. Модифицированный метод обеспечивает автоматический синтез дискретно-событийного управления по исходным данным проектной процедуры и имеет вычислительную сложность, линейного зависящую от размера спецификации.

## 5. Анализ ДССГУ

Проектная процедура анализа ДССГУ позволяет выполнить анализ технических требований спроектированной ДССГУ и получить ее описания для интеграции с остальными компонентами СГУ. Исходными данными этой проектной процедуры является компьютерная модель ДССГУ. Результатом процедуры является компьютерная модель супервизора как отдельного компонента ДССГУ, а также оценки требований ДССГУ к пропускной способности каналов связи и ресурсам вычислительной системы, которую образуют бортовые компьютеры МР и компьютеры пункта управления группой.

Процедура состоит из трех шагов.

- 1) Анализ информационного взаимодействия ДССГУ с объектом управления.
- 2) Получение компьютерной модели супервизора для интеграции в СГУ.
- 3) Генерация программного кода системы управления и документации.

Получаемая в результате процедуры компьютерная модель позволяет сгенерировать программный код для целевой программно-аппаратной платформы и может быть использована на этапе эксплуатации спроектированной ДССГУ для отслеживания процесса ее функционирования, модификации и адаптации к изменяющимся условиям применения МР.

## 6. Заключение

Представленные процедуры образуют маршрут проектирования методики автоматизированного проектирования ДССГУ. Ключевой особенностью этой методики является использование компьютерной модели при выполнении всех проектных процедур. Ограничением является то, что в случае изменения исходных данных

проектировщик вынужден повторить весь маршрут проектирования. Однако этот недостаток компенсируется возможностью повторного использования разработанных ранее компьютерных моделей, простотой их изменения и проверкой корректности на шаге верификации. Использование проектных процедур автоматизированного синтеза ДССГУ при синтезе ДССГУ для трех противопожарных роботов подтверждает их практическую применимость [11].

Проектные процедуры автоматизированного синтеза ДССГУ и компьютерная модель объекта проектирования являются основой для создания специализированной системы автоматизированного проектирования ДССГУ.

## Список литературы

1. Белоглазов Д.А. и др. Групповое управление подвижными объектами в неопределенных средах / Под ред. В. Х. Пшихопова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 305 с.
2. Власов К.С., Тачков А.А., Данилов М.М., Тактика группового применения наземных робототехнических комплексов при тушении пожаров в резервуарных парках // Пожарная безопасность. 2020. № 2 (99). С. 28-35. DOI: 10.37657/vniipo.2020.99.2.002.
3. Максимов А.А., Тачков А.А., Малыхин А.Ю., Рудианов Н.А. Подход к формализации тактической задачи для группы наземных робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы оборонной техники. 2017. Сер. 16. № 7-8. С. 88-96.
4. Волосатова Т.М., Козов А.В., Тачков А.А. Система группового управления мобильными роботами с позиций автоматизированного проектирования // Информационные технологии. 2020. Т. 26, № 5. С. 274-282. DOI 10.17587/it.26.274-282.
5. Козов А.В. Модели и методы проектирования динамически реконфигурируемой системы группового управления мобильными роботами // Автоматизация процессов управления. 2021. № 1 (63). С. 130-139. DOI: 10.35752/1991-2927-2021-1-63-130-139.
6. Козов А.В. Математическая модель дискретно-событийной системы группового управления мобильными роботами // Математические методы в технике и технологиях. Н. Новгород, 2023. С. 59-63.
7. Козов А.В. Реализация компьютерной модели дискретно-событийной системы группового управления мобильными роботами // Экстремальная робототехника. С.Пб., 2022. С. 139-146.
8. Амбарцумян А.А. Супервизорное управление структурированными динамическими дискретно-событийными системами // Автоматика и телемеханика. 2009. № 8. С. 156-176.
9. Амбарцумян А.А. Сетецентрическое управление на сетях Петри в структурированной дискретно-событийной системе // Управление большими системами. 2010. Т. 30.1. С. 506-535. DOI: 10.1134/S0005117912070120.
10. Козов А.В., Мельникова М.В. Применение методов синтеза супервизора при проектировании дискретно-событийной системы группового управления мобильными роботами // Робототехника и техническая кибернетика. 2023. Т. 11, № 2. С. 110-117. DOI: 10.31776/RTSJ.11204.
11. Козов А.В. Автоматизированное проектирование дискретно-событийной системы группового управления мобильными противопожарными роботами // Экстремальная робототехника. С.Пб., 2023. С. 65-70.