

УДК 004.94

Имитационная модель информационно - вычислительной системы для проектирования системы управления мобильного робота

Козов Алексей Владимирович

alexey.kozov@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Представлена разработанная автором имитационная модель информационно-вычислительной системы и пример ее применения при проектировании системы управления для мобильного робота. Имитационная модель основана на вычислительном графе системы управления роботом. Определены два типа информационно-вычислительных ресурсов и показатель качества работы процесса системы управления. Представлена структура и особенности программной реализации имитационной модели. Приведен пример использования модели для оценки качества работы двух процессов системы управления, конкурирующих за информационно-вычислительные ресурсы. Реализованная имитационная модель позволяет обосновать проектные решения при создании систем управления для мобильных роботов.

Ключевые слова: имитационная модель, мобильный робот, система управления, проектирование, вычислительный граф, информационно-вычислительные ресурсы

Введение. На сегодняшний день мобильные робототехнические комплексы (МРТК) находят широкое практическое применение в таких гражданских областях, как логистика и мониторинг. Этому способствует наличие развитой городской и промышленной инфраструктуры, доступность беспроводных каналов связи (мобильные сети 4G и 5G, Wi-Fi) и навигационной информации. Использование удаленных («облачных») вычислительных серверов и отсутствие необходимости решения некоторых ресурсоемких задач управления МРТК в таких условиях даже при ограниченных бортовых ресурсах позволяет достигнуть высокого уровня автономности (т. е. выполнять значительную часть поставленной роботу задачи без непосредственного участия человека-оператора) [1–3].

Применение МРТК специального назначения, например, при тушении пожаров или ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, как правило, происходит в условиях отсутствия достоверной априорной информации о внешней среде, ограниченного доступа к каналам связи и возможности отказов подсистем. Модернизация существующих и создание новых образцов МРТК для автономной работы в таких условиях требует особого внимания к проектированию бортовой вычислительной сети. Для обеспечения заданных показателей качества функционирования системы управления (СУ) необходимо оценить требуемые *информационно-вычислительные ресурсы*. К таким ресурсам следует относить не только процессорное время и оперативную память бортовых компьютеров, но и пропускную способность внутренних шин данных и внешних каналов связи.

В настоящее время при создании СУ МРТК выбор компьютеров и каналов связи для бортовой вычислительной сети зачастую происходит на основе опыта команды разработки, контактов с производителями и доступности решений на рынке. Формальная оценка и обоснование требований к информационно-вычислительным ресурсам при заданных ограничениях позволят принимать лучшие проектные решения. Получить такие требования возможно при помощи имитационной модели информационно-вычислительной системы [4, 5].

Имитационная модель информационно-вычислительной системы. Считаем, что проектируемая СУ МРТК функционирует в виде совокупности взаимодействующих процессов на бортовых компьютерах. Каждый из процессов СУ отвечает за решение информационно-расчетной задачи (ИРЗ), например, классификация сенсорных данных, построение карты внешней среды, планирование траектории автономного движения и др. Результат работы одного процесса может служить входными данными для других процессов. Такая организация СУ соответствует принципам разработки на базе программного каркаса ROS (Robot Operating System) [6].

Для решения ИРЗ процессы используют информационно-вычислительные ресурсы системы, на которой они выполняются. Каждый ресурс характеризуется некоторым *значением*, например, размером оперативной памяти или частотой процессора. Представим ресурсы в виде кортежа их значений, $R = \langle r_1, r_2, \dots, r_N \rangle$, где N — число разных информационно-вычислительных ресурсов моделируемой системы.

Процессы запрашивают ресурсы с заданной частотой, при этом запрашиваемое значение ресурса зависит от особенностей работы процесса. Например, драйверы сенсорных устройств (камеры, лазерные дальномеры и др.), как правило, «потребляют» с постоянной частотой примерно одинаковые значения ресурсов. Процесс планирования траектории автономного движения, наоборот, преимущественно находится в бездействии, однако при поступлении запроса на планирование нуждается в значительном объеме ресурсов для обработки карты внешней среды и построения траектории.

Информационно-вычислительные ресурсы следует подразделять на два вида. Ресурс, общее значение которого не зависит от времени, например, размер оперативной памяти или долговременного хранилища, будем называть *ресурсом объема*. Нехватка такого ресурса влечет приостановку работы процесса СУ до тех пор, пока необходимое значение не станет доступно. Ресурс, ограниченный производительностью информационно-вычислительной системы в единицу времени, например, число операций центрального процессора или пропускная способность внутренней шины данных, назовем *ресурсом времени*. Нехватка ресурса времени означает замедление процесса СУ, но не его остановку. Аналогичный подход с выделением двух видов потребления ресурсов, основанного на объеме и времени, представлен в литературе по оценке производительности компьютеров [7].

Процессы СУ и их взаимодействие отражены в разработанной автором имитационной модели как вычислительный граф $\langle A, C \rangle$, где A — множе-

ство вершин (процессов), C — множество информационных связей между ними [8, 9]. Информационная связь $c_{i,j} \in C$ означает передачу результатов работы процесса $a_i \in A$ процессу $a_j \in A$ для обработки, $i \neq j$. На рис. 1 представлен фрагмент вычислительного графа системы автономного управления движением МРТК [1].

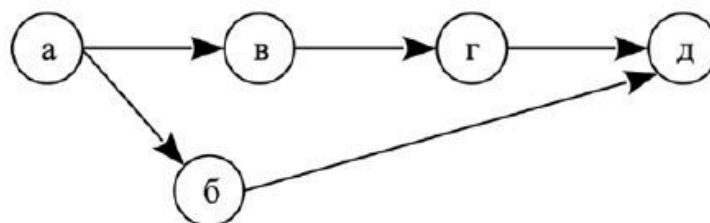


Рис. 1. Фрагмент вычислительного графа системы автономного управления движением МРТК, показаны информационные связи процессов:

a — классификация объектов; b — обеспечение безопасности автономного движения;
 v — построение карты внешней среды; g — планирование траектории; d — траекторный регулятор

Для каждого процесса a_i задан D_i — кортеж из N элементов. Каждый элемент D_i определяет закон распределения значений ресурса, на основании которого формируются «заявки» процесса на этот ресурс для решения ИРЗ. Процесс может находиться либо в состоянии *работы*, либо в состоянии *ожидания*. В состоянии работы процесс с заданной частотой f_i^r генерирует заявки. Процесс переходит в состояние ожидания, если к моменту генерации его текущая заявка оказалась неудовлетворенной хотя бы по одному из ресурсов. В этом случае на каждом такте модельного времени происходит проверка заявки, и в случае, если заявка окажется выполненной, процесс возвращается в состояние работы и генерирует новую заявку. Отношение числа выполненных заявок за секунду модельного времени и f_i^r дает оценку *качества работы процесса* моделируемой информационно-вычислительной системы.

Бортовой компьютер представлен кортежем ресурсов R и списком заявок на них L . Для каждого ресурса задано его максимальное доступное и текущее свободное значение. Заявки взаимно однозначно связаны с процессами и содержат значения ресурсов, полученные на основе законов распределения из D_i . Общая структура имитационной модели представлена на рис. 2.

Входными (исходными) данными для моделирования являются продолжительность моделирования, доступные значения информационно-вычислительных ресурсов, вычислительный граф и параметры процессов. Результатом моделирования (выходными данными) являются статистика использования ресурсов, время ожидания и доля выполненных заявок для каждого процесса СУ.

Имитационная модель реализована на языке C++ в виде динамической программной библиотеки для операционных систем семейства Linux. Реализация включает внутренний предметно-ориентированный язык для описания вычислительного графа и ресурсов моделируемой системы. Реализованы тесты для проверки корректности работы отдельных программных модулей модели.

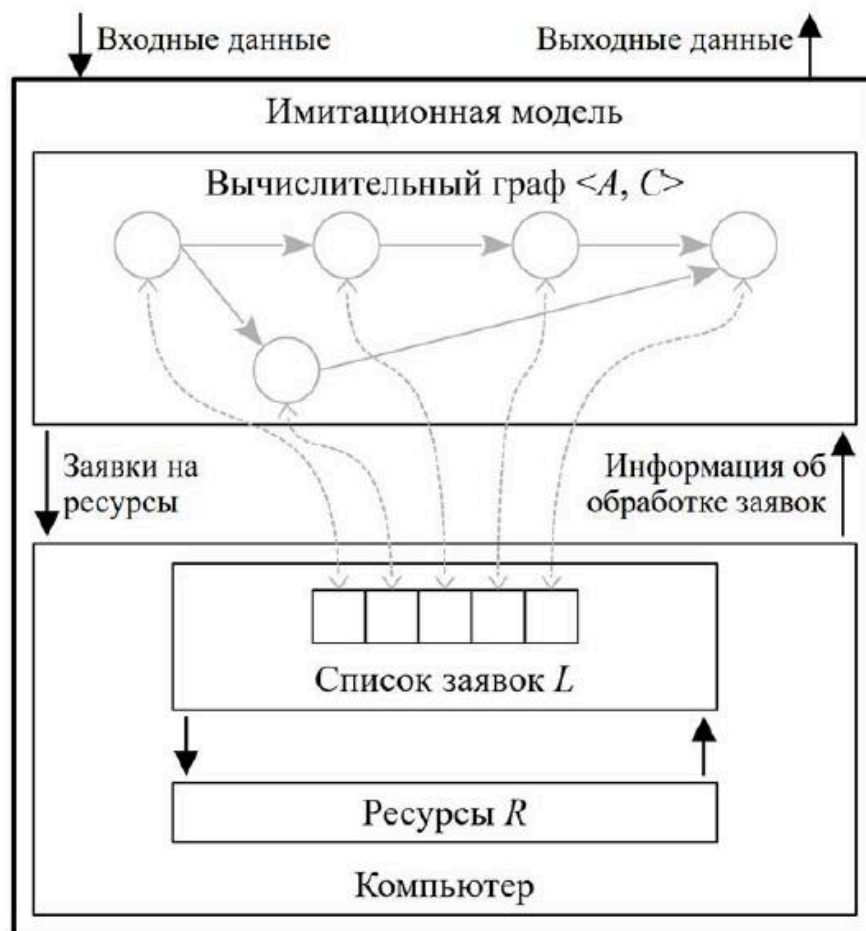


Рис. 2. Структура имитационной модели информационно-вычислительной системы

Применение разработанной имитационной модели. На рис. 3 изображен результат моделирования работы двух процессов СУ МРТК. Бортвой компьютер обладает 1 ГиБ оперативной памяти и двоядерным процессором с частотой каждого ядра 1,2 ГГц. Во время работы процессы конкурируют за процессорное время и оперативную память. Результаты моделирования представлены в виде гистограммы использования ресурсов и статистики работы процессов. На гистограммах по вертикали представлен процент использования ресурса (200 % означает полную загрузку двух ядер процессора), число символов * по горизонтали соответствует доле от времени моделирования.

Предметно-ориентированный язык описания модели позволяет варьировать как параметры бортовой вычислительной сети МРТК, так и параметры процессов СУ (частоту их работы, параметры законов распределения значений требуемых информационно-вычислительных ресурсов). Таким образом, запуск модели позволяет оценить качество работы СУ на бортовой вычислительной сети с заданными параметрами или, наоборот, подобрать ее параметры, которые обеспечивают требуемые показатели качества.

Заключение. Создание СУ автономных МРТК связано с необходимостью проектирования структуры и выбора элементов бортовой вычислитель-

ной сети. Проектные решения должны обеспечить автономное решение ресурсоемких задач классификация объектов, построения карты внешней среды, планирования траектории движения робота. Формальная оценка качества работы СУ и требований к информационно-вычислительным ресурсам при помощи представленной имитационной модели позволяют обобщить опыт проектировщика и обосновать принимаемые проектные решения.

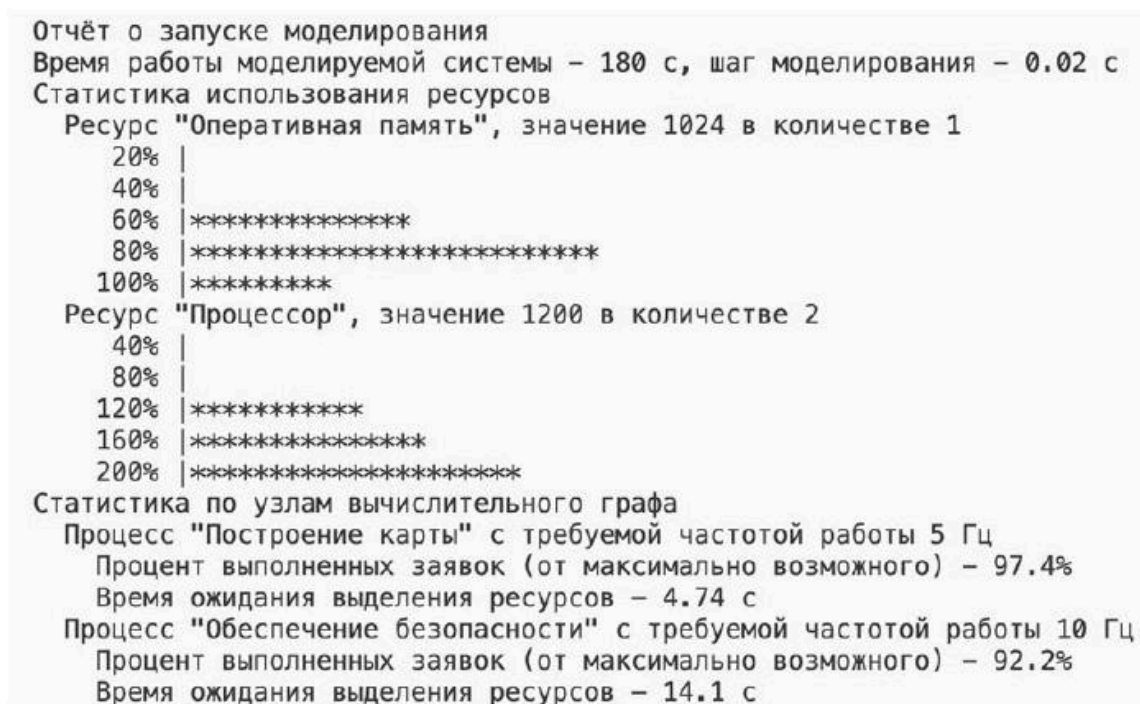


Рис. 3. Пример результатов моделирования работы двух конкурирующих процессов СУ

Недостатками представленной имитационной модели является необходимость в знании законов распределения значений ресурсов, требуемых для работы моделируемых процессов. Получение таких законов при помощи средств операционной системы не составляет труда при наличии программных моделей или работающего прототипа СУ [7]. Иначе проектировщику следует использовать асимптотический анализ сложности алгоритмов работы и оценку размерности входных данных процесса. В таком случае необходимы итерационные проверки корректности модели в процессе реализации основных алгоритмов работы СУ.

Представленная модель может служить основой для комплексных имитационных моделей функционирования МРТК. Такие модели смогут учитывать условия применения и системные связи компонентов моделируемой СУ (например, вероятности ошибок классификаторов или погрешность навигационной подсистемы), а в перспективе — динамику МРТК и взаимодействие с внешней средой.

Список источников

- [1] Тачков А.А. и др. Принципы построения систем автономного управления движением наземных робототехнических комплексов специального назначения. *Робототехника и техническая кибернетика*, 2022, т. 10, № 2, с. 121–132. <https://doi.org/10.31776/RTCJ.10205>
- [2] Тачков А.А., Курочкин С.Ю., Яковлев Д.С. Применение методов искусственного интеллекта в системе автономного управления движением наземных робототехнических комплексов. *Двойные технологии*, 2023, № 2 (103), с. 70–76.
- [3] Рубцов В.И. и др. Многоуровневая система управления группой роботов для работы в условиях Арктики. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 2021, № 7, с. 53–61. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-7-53-61>
- [4] Рыжиков Ю.И. *Имитационное моделирование. Авторская имитация систем и сетей с очередями*. Санкт-Петербург, Лань, 2019, 112 с.
- [5] Норенков И.П. *Основы автоматизированного проектирования*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 430 с.
- [6] Тачков А.А., Вуколов А.Ю., Козов А.В. Особенности портирования Robot Operating System на программно-аппаратную платформу «Эльбрус». *Программные продукты и системы*, 2019, № 4, с. 655–664.
- [7] Грегг Б. *Производительность систем*. Санкт-Петербург, Питер, 2023, 992 с.
- [8] Козов А.В. Математическая модель дискретно-событийной системы группового управления мобильными роботами. *Математические методы в технологиях и технике*, 2023, с. 59–63. https://doi.org/10.52348/2712-8873_MMTT_2023_4_59
- [9] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 449 с.

Simulation model of information - computing system for the design of mobile robot control system

Kozov Alexey V. alexey.kozov@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

This paper presents a simulation model of an information-computing system developed by the author and an example of its application in the design of mobile robot control system. The simulation model uses the computational graph of the robot control system. The paper introduces two types of information-computing resources and a process quality indicator. The structure and features of the software implementation of the simulation model are presented. An example shows the use of the model to evaluate the performance quality of two processes of the control system. The realized simulation model allows to justify design decisions when engineering control systems for mobile robots.

Keywords: simulation model, mobile robot, control system, design, computational graph, computational resources