УДК 004.942
DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-4-741-753

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНО-ОБЪЕКТНОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ РАЗРАБОТКИ И АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

APPLICATION OF SYSTEM-OBJECTIVE SIMULATION MODELING IN THE PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT AND APPROVATION OF ALMORITIES FOR MANAGEMENT OF MOTION OF UNMANNED VEHICLES

И.А. Егоров[1], Е.М. Маматов[1], Е.А. Михайлюк[2], А.З. Ядута[1]
I.A. Egorov[1], E.M. Mamatov[1], E.A. Mikhaylyuk[2], A.Z. Yaduta[1]

'^Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85
[2)]Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Россия, 309516, Белгородская область, Старый Оскол, м-н Макаренко, д. 42

'^Belgorod National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia
[2)]National University of Science and Technology "MISIS", 42 Makarenko St, Staryy Oskol,
Belgorod region, 309516, Russia

E-mail: 888615@bsu.edu.ru, mamatov@bsu.edu.ru

Аннотация

Задача управления движением автономных роботизированных транспортных средств с каждым годом становится все актуальнее. В последние годы можно наблюдать бурный рост общественного внимания к автономным транспортным средствам, причем, сюда относятся не только беспилотные автомобили, а любые роботизированные автономные механизмы, позволяющие перемещать грузы из одной точки в другую, яркий пример - коммерческие решения в области складской логистики. Ежегодно на специализированных выставках представляются новые технологии управления движением беспилотных транспортных средств. Но несмотря на достаточно высокий уровень научно-технических разработок в области интеллектуальных транспортных средств, актуальной остается задача повышения эффективности алгоритмов управления движением автономных роботизированных комплексов в условиях динамических препятствий. В статье рассматриваются перспективы применения теории и инструментальных средств системно-объектного имитационного моделирования. В частности рассматривается разработка системно-объектной имитационной модели библиотеки управления движением автономной роботизированной тележки, реализуется простой алгоритм преодоления препятствий, возникающих на пути движения. Показана целесообразность применения программной платформы «UFOModeler» для разработки и апробации алгоритмов управления.

Abstract

The task of controlling the movement of autonomous robotic vehicles every year is becoming increasingly important. In recent years, there has been a rapid increase in public attention to autonomous vehicles, and this includes not only unmanned vehicles, but any robotic autonomous mechanisms that allow moving goods from one point to another, a vivid example is commercial solutions in the field of warehouse logistics. Annually, at specialized exhibitions, new technologies for controlling the movement of unmanned vehicles are presented. But, despite the relatively high level of scientific and technical developments in the field of intelligent vehicles, the urgent task remains to improve the efficiency of the motion control algorithms of autonomous robotic systems in dynamic obstacles. The article discusses the prospects for the application of the theory and tools of system-object simulation. In particular, the development of a system-object simulation model of the library for controlling the movement of an autonomous robotic carriage is considered, a simple algorithm for overcoming obstacles that arise in the way of movement is implemented. The expediency of using the «UFOModeler» software platform for the development and testing of control algorithms is shown.

Ключевые слова: управление движением, библиотека, системно-объектная модель, имитационная модель, «UFOModeler», автономное транспортное средство.
Keywords: motion control, library, system-object model, simulation model, «UFOModeler», autonomous vehicle.

Введение

В последние десятилетия человечество наблюдает бурное развитие информационных технологий как направления науки и техники. Эта тенденция связана, прежде всего, с появлением доступной вычислительной техники (персональных компьютеров, мобильных устройств и т. п.), а также с развитием фундаментальных дисциплин, обеспечивающих научно-технический прогресс в данном направлении. Одним из перспективных направлений науки и техники в настоящее время является робототехника, которая развивается мощными темпами и охватывает все больше областей жизнедеятельности человека. Главным направлением развития робототехники и по сей день остается промышленность. Так первым промышленным роботом, предназначенным для разгрузки литейных машин, можно назвать устройство, которое использовалось компанией Дженерал Моторс (США) на заводах по производству силовых агрегатов для автомобильной промышленности [Крейг, 2013]. Однако робототехника в то время развивалась очень медленно, так как не было возможности и технологий производить специальные устройства управления роботом (контроллер). В то время компьютеры были очень громоздкие и дорогие. С развитием микроэлектроники как направления, робототехника перестала быть фантастикой и сегодня роботы выполняют львиную долю человеческого труда, и эта доля с каждым днем только растет. Одним из отдельных направлений развития робототехники являются автономные роботы, перемещающиеся в пространстве. Мы видим, что по улицам крупных городов уже все чаще появляются полностью автономные автомобили (Тесла, Яндекс Такси), почтовые и транспортные компании также активно применяют в своей деятельности автономных роботов, перемещающих грузы в пределах склада и многие другие. В связи с этим появилось большое количество разработок, связанных с управлением движением робота в условиях наличия естественных препятствий, навигацией робота и др. Крупные коммерческие компании финансируют целые научно-исследовательские центры, основная задача которых - разработка эффективных алгоритмов управления навигацией и движением автономного мобильного робота. Большинство этих проектов, по понятным причинам, являются закрытыми. Однако актуальной остается задача повышения эффективности таких алгоритмов, причем для апробации алгоритмов управления использование реальных технических устройств не целесообразно, так как возможны серьезные финансовые потери. Разработчики программного обеспечения часто прибегают к использованию имитационного моделирования как средства разработки и апробации алгоритмов управления. По мнению авторов, одним из таких средств может стать метод системно-объектного имитационного моделирования [Zhikharev et al, 2016].

Основные понятия и определения

Рассмотрим системно-объектную имитационную модель [Жихарев и др., 2015], представляющую собой симулятор библиотеки управления мобильной роботизированной тележкой. Для разработки модели опишем ее основные элементы в терминах исчисления систем как функциональных узлов [Matorin, Zhikharev, 2018]. В общем виде системно-объектная модель библиотеки управления движением имеет вид:

$$M=(L,S), \quad (1)$$

где: M - библиотека управления движением автономной роботизированной тележки, L - множество потоковых объектов [Жихарев, Маторин, 2014]. Рассмотрим подробнее компоненты множества L - потоковые объекты разрабатываемой библиотеки:

- **Угол наклона [tga]** - потоковый объект, который будет хранить текущее значение тангенса угла наклона вектора движения автономной роботизированной тележки;
- **Скорость [v]** - потоковый объект имеет одно поле, где будет храниться мгновенная скорость роботизированной тележки;
- **ПСП [r]** - потоковый объект, имеющий одно поле, где будет храниться разряд псевдослучайной двоичной последовательности. В модели псевдослучайная последовательность используется для имитации преград на пути движения автономной роботизированной тележки;
- **Сигнал о препятствии [s]** - потоковый объект, имеющий одно поле логического типа, которое принимает значение true, если инфракрасный датчик показывает препятствие на пути движения, и значение false, если препятствий нет;
- **Координаты цели [X, Y]** - потоковый объект, имеющий два поля, в которых хранятся координаты целевой точки на плоскости;
- **Стартовый вектор движения [tga]** - потоковый объект, имеющий одно поле, в котором хранится значение тангенса угла наклона стартового вектора движения. Причем начало движения роботизированной тележки всегда начинается в начале координат, т. е. если, например, координаты целевой точки равны, соответственно координаты цели X=7 и координаты цели Y=26, тогда стартовый вектор рассчитывается как прямая, проходящая через точки (0,0) и (7,26). Тогда уравнение такой прямой примет вид: y=(26/7)x. Такая прямая характеризуется только коэффициентом угла наклона, который в рассмотренном выше примере равен 26/7.
- **Текущее положение робота [X, Y]** - потоковый объект, имеющий два поля, в которых хранятся координаты текущего положения робота относительно стартовой точки, т. е. начала координат.

Далее рассмотрим подробнее компоненты множества S со следующими узловыми объектами:

- генератор псевдослучайной последовательности - необходим для расстановки препятствий на пути движения автономной роботизированной тележки;
- автономная мобильная роботизированная тележка;
- модуль навигации;
- инфракрасные датчики;
- контроллер;
- библиотека управления движением;
- драйвер двигателя.

Рассмотрим подробнее узловые объекты модели, а точнее их структурные характеристики. Узловой объект «Генератор псевдослучайных чисел» имеет следующий вид, в терминах исчисления систем как функциональных объектов [Zhikharev et al, 2018].

S - множество узловых объектов модели, элементы которого описываются следующей формой (2):

sn=[L?={l?1, l?2, l?3}, L!={l!1,l!2}; f(L?)L!; O?, O!, Of]. (2)

Первый узловой объект модели - генератор псевдослучайных чисел, формально имеет следующую форму:

Генератор ПСП=[L?=0, L!={псп}; Генерация ПСП(0)ПСП; 0, 0, 0]. (3)

Представленный узловой объект предназначен для генерирования псевдослучайной последовательности, которая, в свою очередь, используется для имитации препятствия в процессе движения автономной роботизированной тележки. Функция узлового объекта будет реализована с помощью встроенного языка программирования. Рассмотрим подробнее алгоритм генерации псевдослучайной последовательности. Основная задача алгоритма - генерировать один бит двоичной последовательности с временной задержкой и записывать его в выходной потоковый объект для дальнейшей обработки. В алгоритме используется метод генерации псевдослучайной последовательности с линейным обратным сдвигом [Кельтон, Лоу; 2004]. Сперва инициализируется рабочий регистр в виде массива размером 20 значений. Данный массив хранит значения бит, то есть 0 или 1. Далее выполняется начальная инициализация регистра, полностью заполняется единицами, а второй, пятый и шестой элементы заполняются нулями. После начальной инициализации необходим бесконечный цикл, в рамках которого рассчитывается значение очередного бита информации как значения операции исключающего или между третьим, шестым и первым разрядами рабочего регистра. Далее на выход присваивается последний бит рабочего регистра (сгенерированный бит псевдослучайной последовательности), после чего осуществляется сдвиг вперед на один шаг всего рабочего массива, после сдвига нулевое место занимает рассчитанный бит в предыдущем шаге.

После выполнения сдвига реализуется временная задержка, равная двум секундам реального времени. Таким образом, данный алгоритм будет генерировать по одному биту псевдослучайной последовательности в две секунды, пока запущен процесс симуляции.

Следующий узловой объект, который необходимо рассмотреть, представляет собой модель, собственно, автономной мобильной роботизированной тележки, формально данный узловой объект принимает следующий вид:

Автономная мобильная роботизированная тележка=[L?={nCn}, L!={Угол наклона, Текущее положение робота, Скорость}; Движение тележки(ПСП) Угол наклона, Текущее положение робота, Скорость; 0, 0, 0] (4)

Как видно из выражения 4, в качестве выходных потоковых объектов автономной мобильной роботизированной тележки выступают: угол наклона вектора движения относительно оси OX, текущее положение робота - координаты x и y, скорость движения. Перечисленные параметры полностью характеризуют положение тележки в заданный момент времени. Т. е. данные параметры и будут результатом симуляции процесса управления движением с учетом возникающих препятствий. Функция представленного выше узлового объекта реализуется с помощь узловых объектов нижнего яруса:

- модуль навигации;
- инфракрасные датчики;
- контроллер.

Данные узловые объекты фактически отражают основные элементы, с которыми необходимо взаимодействовать в процессе движения. Рассмотрим подробнее узел - модуль навигации, формально данный узел имеет вид, как показано в выражении ниже:

Модуль навигации=[L?={0}, L!={Координаты цели, стартовый вектор движения}; Расчет вектора движения(0) Координаты цели, стартовый вектор движения; 0, 0, {ЦельOX, ЦельOY, СтартOX=0, СтартOY=0}] (5)

Как видно из выражения 5, модуль навигации имитирует работу навигационной системы тележки, и результатом его функционирования является формирование координат целевой точки, которую необходимо достигнуть роботу относительно его текущего положения и стартовый вектор движения, который, в свою очередь, характеризуется тангенсом угла наклона прямой, проходящей через начало координат и целевую точку. Также данный узловой объект имеет четыре объектных характеристики: координаты целевой точки и координаты стартовой точки (принято за условие, что робот всегда начинает свое движение из начала координат).

Координаты целевой точки и координаты стартовой точки получаем из соответствующих объектных характеристик. После этого координаты целевой точки инициализируются в соответствующие поля выходного потокового объекта. Далее рассчитывается коэффициент угла наклона прямой по отношению к оси OX, причем стартовый вектор движения проходит через начало координат и целевую точку, как показано на рисунке ниже:

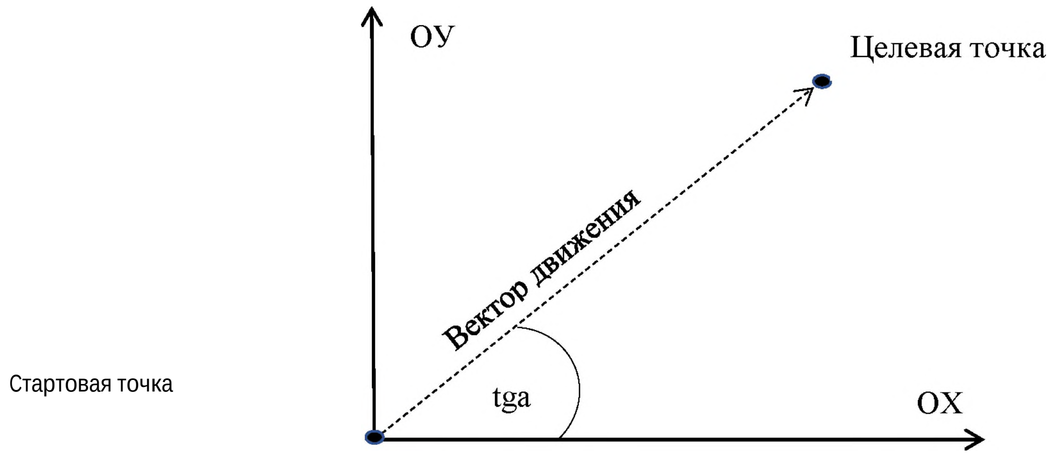

Рис. 1. Расчет стартового вектора движения на плоскости
Fig. 1. The calculation of the starting motion vector on the plane

Из представленного выше рисунка видно, что в начале движения симулятор «считает», что препятствия на пути следования отсутствуют.

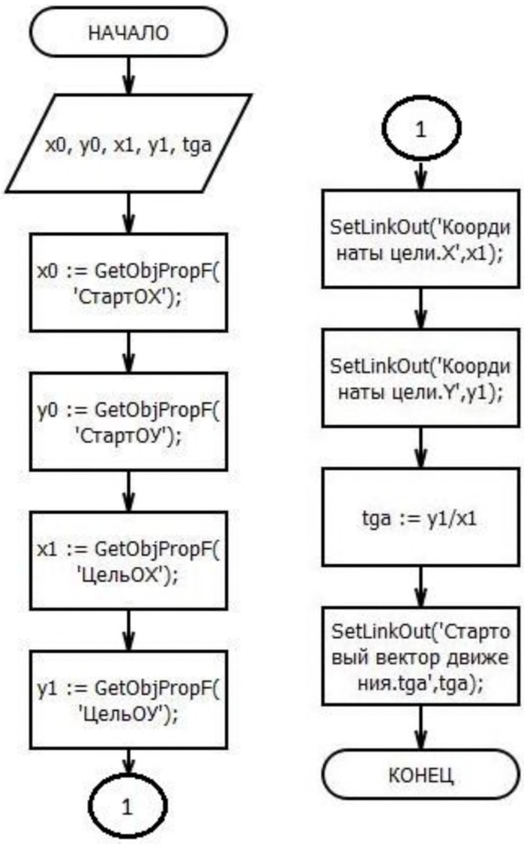

Рис. 2. Алгоритм функционирования модуля навигации системы
Fig. 2. The functioning algorithm of the system navigation module

Далее рассмотрим узловой объект, имитирующий работу инфракрасных датчиков. Формально данный узловой объект имеет следующий вид:

Инфракрасные датчики=[L?={ПСП}, L!={Сигнал о препятствии}; Обнаружение препятствий (ПСП) Сигнал о препятствии; 0, 0, 0]. (6)

Узловой объект, имитирующий работу инфракрасных датчиков, содержит функцию, которая генерирует значение **true** или **false** в зависимости от наличия или отсутствия препятствия на пути. Рассмотрим подробнее алгоритм реализации метода данного узлового объекта:

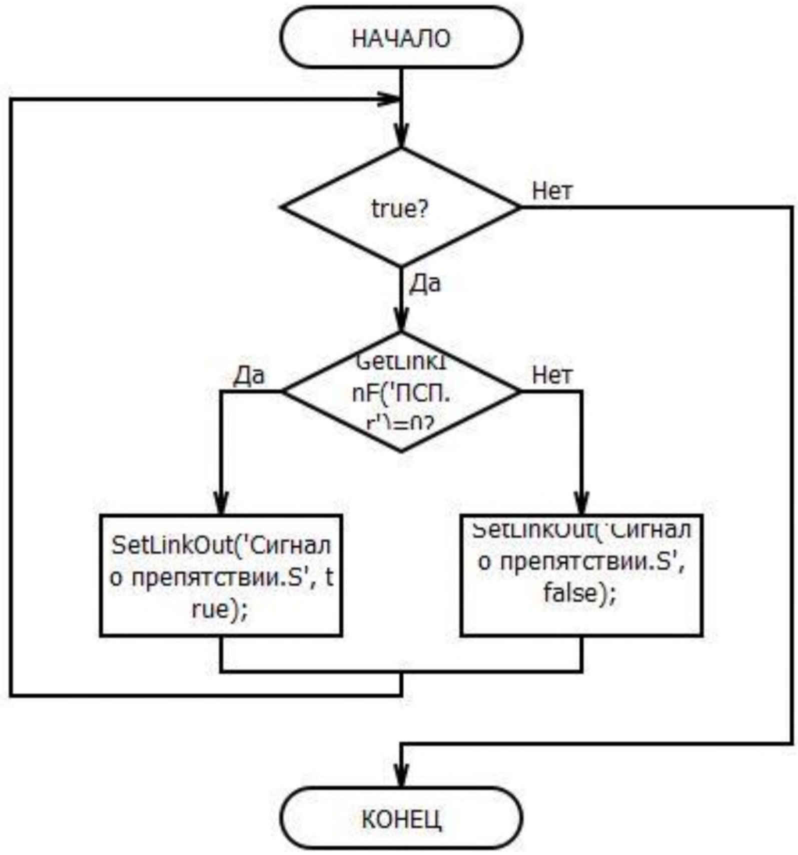

Рис. 3. Алгоритм реализации метода узлового объекта «Инфракрасные датчики»
Fig. 3. The implementation algorithm of the method of the nodal object "Infrared sensors"

Представленный выше алгоритм функционирует в бесконечном цикле и работает по следующему принципу: если очередной бит информации равен единице, тогда на выход отправляем сигнал о наличии препятствия, иначе - об отсутствии.

Алгоритм управления движением

Далее рассмотрим собственно библиотеку управления движением автономной роботизированной тележки. Основная идея алгоритма предельно проста и состоит в постепенном обходе препятствий с последующим перерасчетом параметров вектора движения. Первоначально вектор движения представлен как прямая, проходящая через начало координат и точку цели, соответственно, если начальные координаты обозначим как x1 и y1, а x2 и y2 координаты целевой точки, причем ранее мы говорили, что в качестве стартовой точки мы принимаем начало координат, т. е. x1=0 и y1=0, тогда вектор начального направления движения будет равен следующему соотношению: y=tga*x, где tga - коэффициент угла наклона прямой относительно оси OX. Далее реализуется непрерывный опрос инфракрасных датчиков на предмет наличия препятствия. Если препятствий нет, тогда двигаемся к целевой точке со штатной скоростью, если впереди обнаружено препятствие, тогда реализуется процедура объезда с последующим перерасчетом параметров вектора движения. Процедура объезда препятствия организуется следующим образом: если текущая координата «у» меньше соответствующей координаты цели (т. е. текущее положение ниже целевой точки), тогда угол наклона вектора меняем на значение 0.04 (экспериментальное значение, при котором достигается наибольшая эффективность алгоритма) соответствует объезду препятствия слева. Если же текущая координата «у» больше соответствующей координаты целевой точки, т. е. текущее положение роботизированной тележки выше целевой точки, тогда изменяем угол наклона вектора движения на значение -0.04, что соответствует объезду препятствия справа (см. подробнее рисунок 4). После поворота вправо или влево автономная тележка продолжает движение с заданной штатной скоростью по новому вектору движения 2 секунды, после чего осуществляется попытка поворота к целевой точке. Для этого рассчитываются параметры нового вектора движения - как прямой, проходящей через точку текущего положения автономной роботизированной тележки и целевой точки. Если на новом пути есть препятствие, тогда реализуется процедура объезда в зависимости от текущего положения относительно целевой точки, если препятствий нет, тогда продолжаем движение к цели со штатной скоростью.

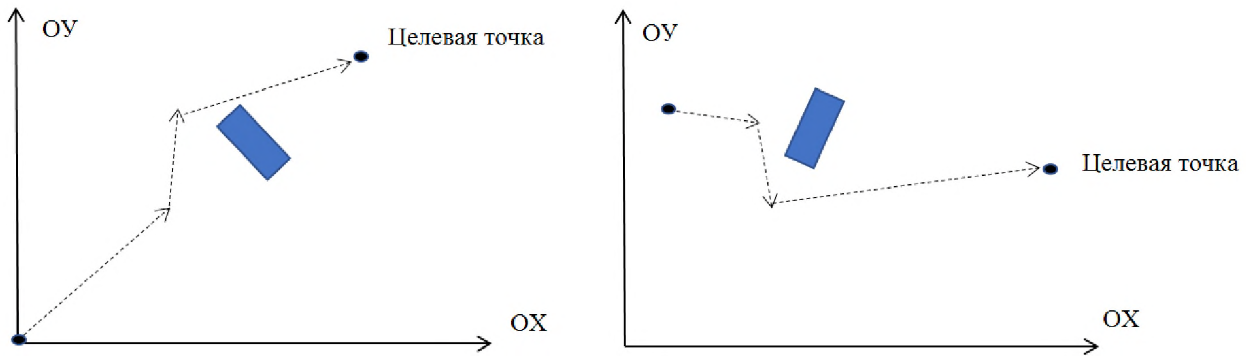

Рис. 4. Алгоритм объезда препятствия при нахождении ниже целевой точки (слева) и при нахождении выше целевой точки (справа)
Fig. *4*. The algorithm for avoiding an obstacle when it is below the target point (left) and when it is above the target point (right)

В целом работа алгоритма продолжается, пока текущее положение робота и целевая точка не будут равны. Рассмотрим формальное представление данного узлового объекта, который представлен в следующей форме:

Библиотека управления движением=[L?={Стартовый вектор движения, Сигнал о препятствии, Координаты цели}, L!={Скорость, Угол наклона, Текущее положение робота}; Расчет траектории движения (Стартовый вектор движения, Сигнал о препятствии, Координаты цели) Скорость, Угол наклона, Текущее положение робота; 0, 0, 0] (7)

Как было описано выше, метод узлового объекта формирует параметры движения в зависимости от наличия препятствий на пути, алгоритм функционирования данного блока представлен на рисунках ниже:

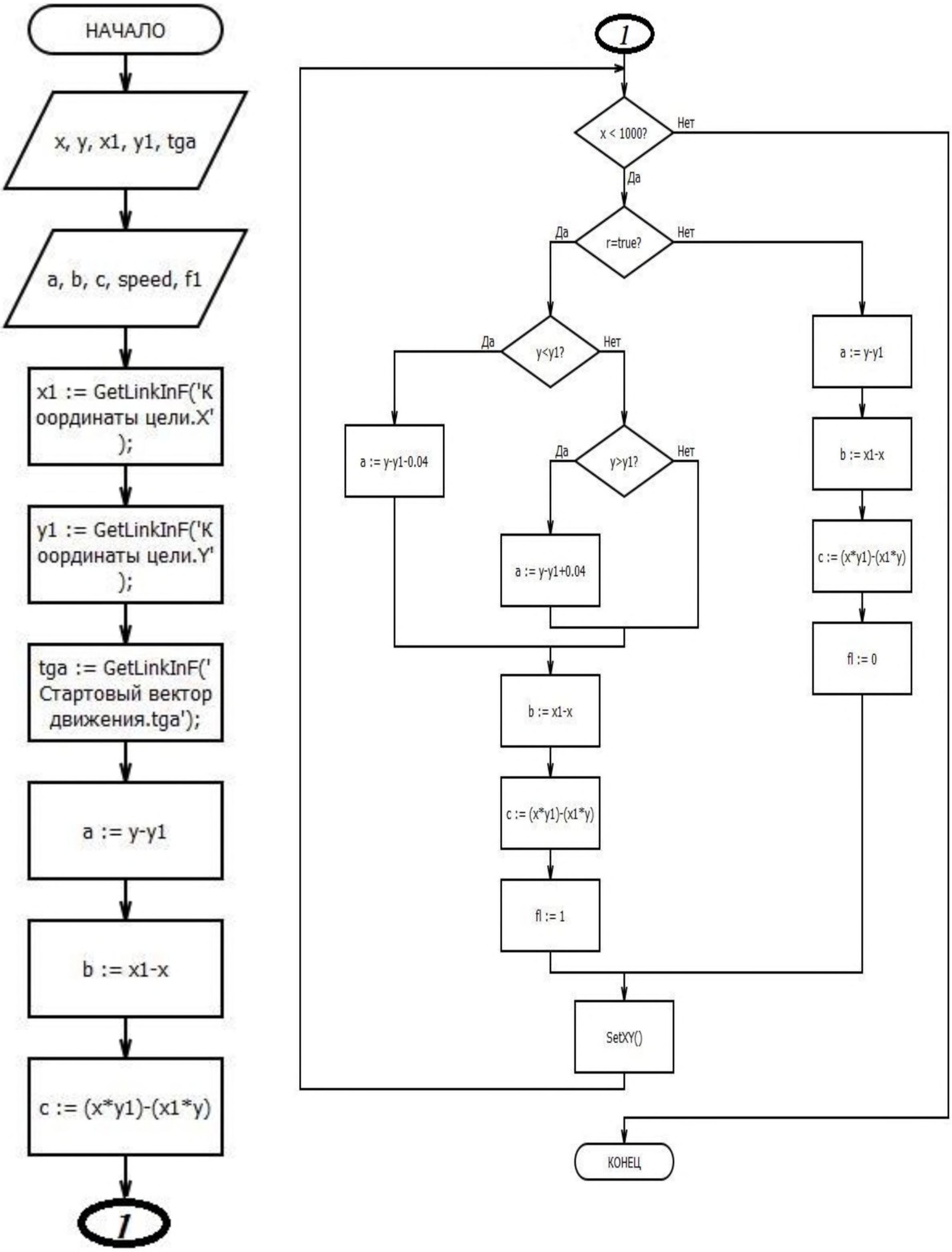

Рис. 5. Алгоритм функционирования метода узлового объекта
Fig. 5. The algorithm of functioning of the nodal object method

Рассмотренная модель после реализации будет имитировать движение автономной роботизированной тележки по алгоритму, представленному на рисунке 5. Для тестирования разработанной модели запустим ее на исполнение. Общий вид окна симуляции в среде UFOModeler представлен на рисунке ниже:

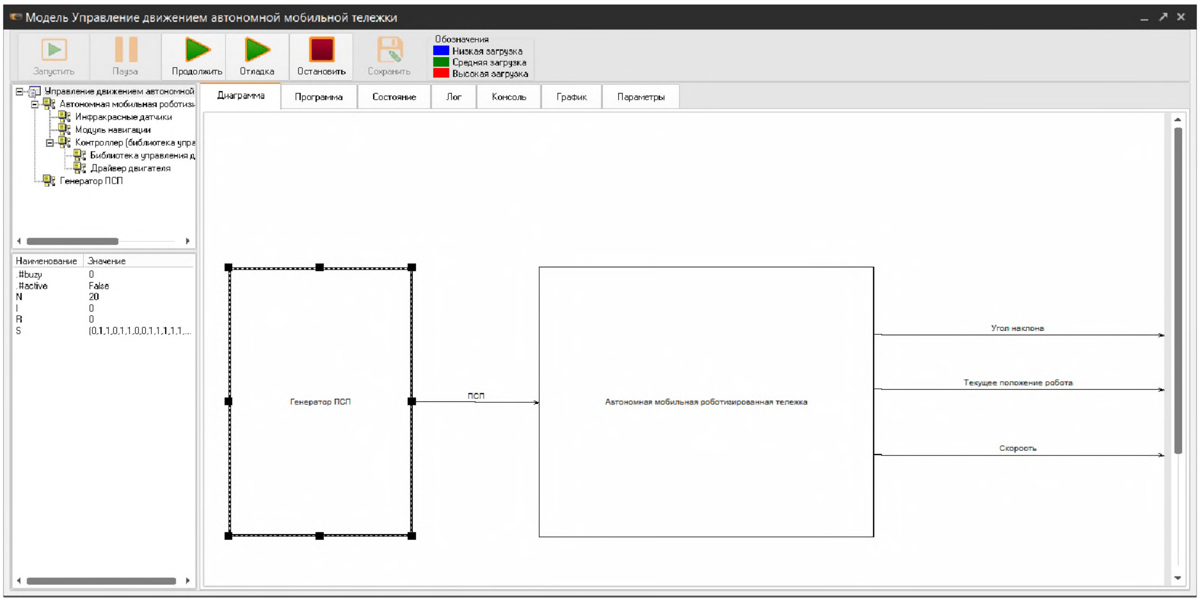

Рис. 6. Общий вид окна симуляции в среде UFOModeler

Fig. 6. General view of the simulation window in the UFOModeler environment

Сначала протестируем работу генератора псевдослучайной последовательности, для этого выведем на график значения, сгенерированные данным узловым объектом. Для этого необходимо во вкладке параметров симуляции выбрать соответствующий параметр для визуализации:

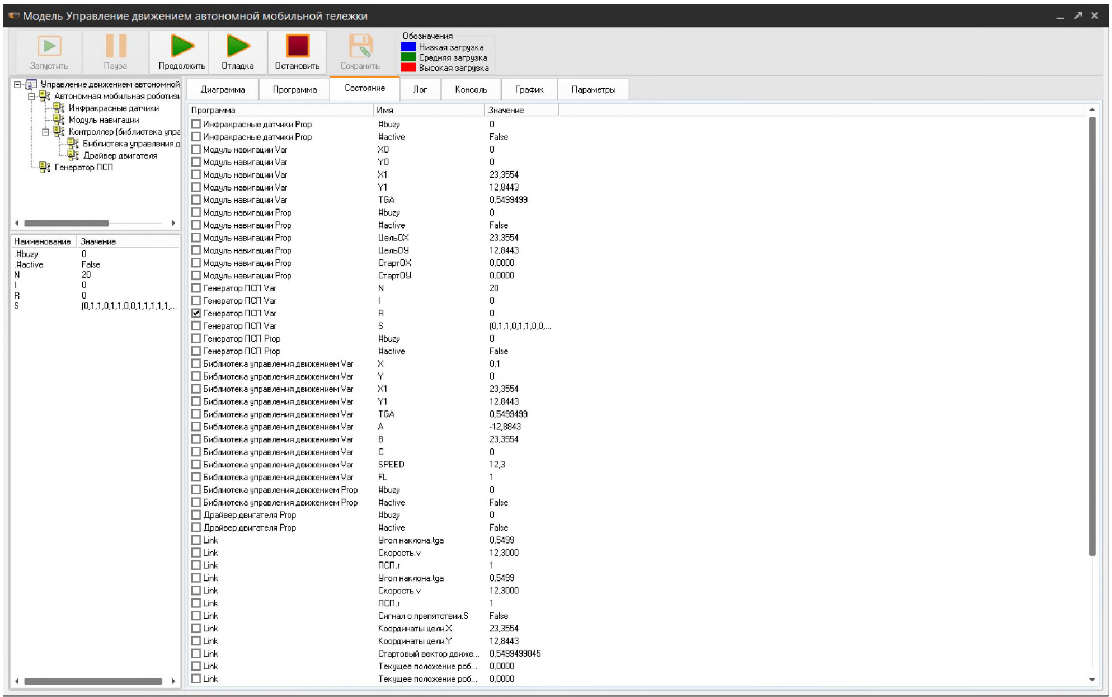

Рис. 7. Параметры симуляции

Fig. 7. Parameters of simulation

После выбора параметров платформа позволяет визуализировать данные в виде графика, как показано на рисунке ниже:

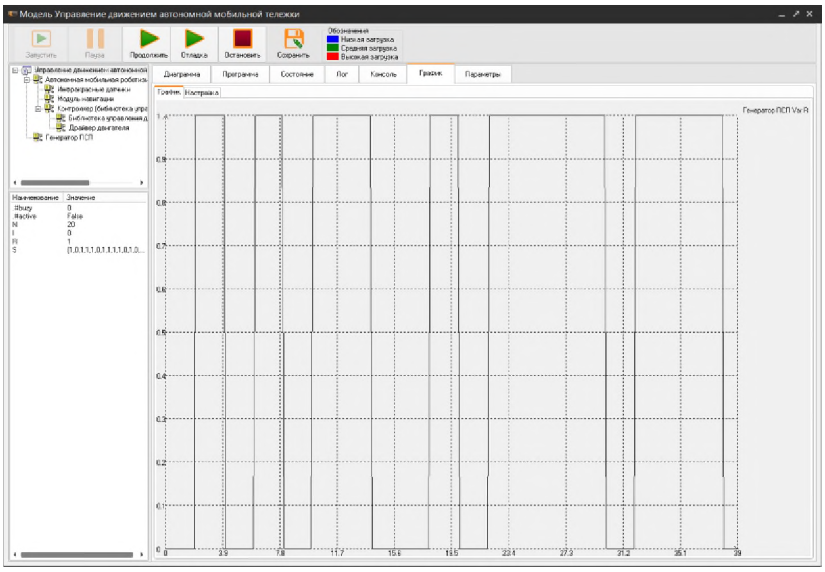

Рис. 8. Визуализация работы генератора ПСП
Fig. 8. Visualization of the pseudo-random sequence generator

Далее смоделируем движение автономной роботизированной тележки от начала координат до целевой точки, пройденный путь представлен на рисунке ниже:

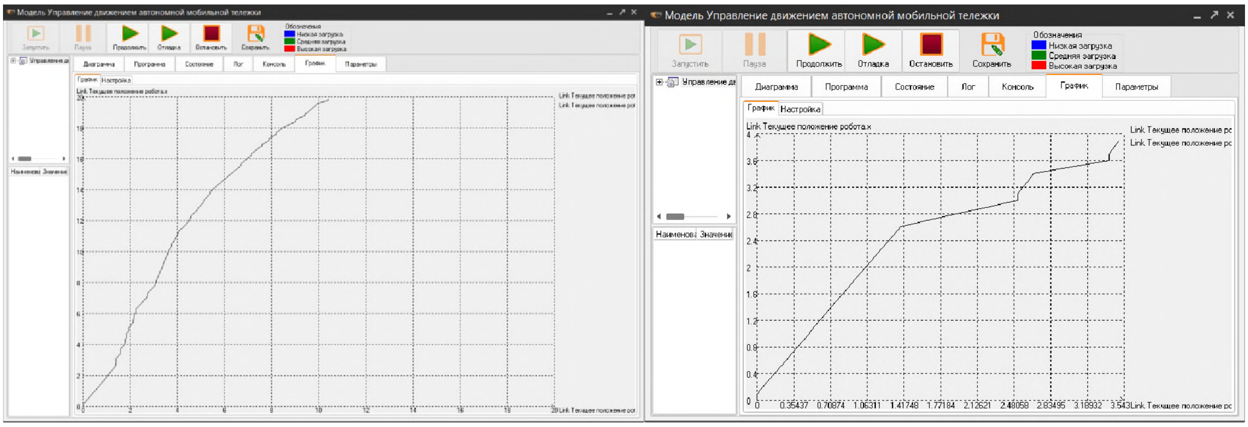

Рис. 9. Результаты имитации движения к целевой точке
Fig. 9. The results of simulating the movement of the target point

Как видно из рисунка 9, в данном случае целевая точка находится почти всегда выше текущей позиции робота, поэтому осуществляется объезд слева. Рассмотрим для примера ситуацию, когда целевая точка находится ниже текущего положения, тогда результат обхода препятствия примет вид, как показано на рисунке 9 справа. Таким же образом пользователь имеет возможность отрабатывать параметры алгоритмов в случаях преодоления статических препятствий. Кроме того, как известно, задача управления движением автономной роботизированной тележки часто формулируется в условиях необходимости двигаться по заранее заданной траектории. В таком случае, если рассматривать логику алгоритма, представленного в настоящей работе, траекторию можно представить в виде набора близких векторов, причем их количество будет зависеть от кривизны исходной траектории. Тогда параметры движения будут меняться в зависимости от текущего местонахождения роботизированной тележки.

Заключение

Рассмотренный вариант реализации алгоритма управления движением беспилотного транспортного средства позволяет говорить о том, что применение системно-объектного имитационного моделирования для решения задач, связанных с разработкой и апробацией алгоритмов управления движением в условиях наличия препятствий, является перспективным направлением развития системно-объектного имитационного моделирования.

Программный инструментарий имитационного моделирования процессов и систем UFOModeler позволяет импортировать узловые объекты модели в виде библиотеки в формат XML, что, в свою очередь, открывает возможности конвертации управляющих модулей в другие форматы для дальнейшего использования.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке проектов Российского фонда фундаментальных исследований № № 18-07-00355, 19-07-00290, 19-07-00111.

Список литературы

1. Егоров И.А., Жихарев А.Г., Маторин С.И. 2018. К вопросу оптимизации системно-объектных имитационных моделей. Тезисы XIX Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям: 61-62.
2. Жихарев А.Г., Маторин С.И. 2014. Системно-объектное моделирование технологических процессов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика, 21 (192): 137-142.
3. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектное имитационное моделирование транспортных и технологических процессов. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика, 7 (204): 159-170.
4. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Зайцева Н.О. 2015. Системно-объектный инструментарий для имитационного моделирования технологических процессов и транспортных потоков. Искусственный интеллект и принятие решений, 4:95-103.
5. Жихарев А.Г., Маторин С.И., Маматов Е.М., Смородина Н.Н. 2013. О системно-объектном методе представления организационных знаний. Научные ведомости БелГУ. Сер. Информатика, 8(151):137-146.
6. Казиев В.М. 2007. Введение в анализ, синтез и моделирование систем. 2-е издание. М.: Бином. Лаборатория знаний, Серия: Основы информационных технологий.
7. Кельтон В., Лоу А. 2004. Имитационное моделирование. Классика CS. - 3-е изд. СПб.: Питер, 487.
8. Крейг Джон. 2013. Введение в робототехнику. Механика и управление. М.: Институт компьютерных исследований, 564.
9. Маторин С.И., Жихарев А.Г, Зайцева Н.О., Брусенская И.Н. 2013. Имитационное моделирование транспортных потоков с применением УФО-подхода. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика, 22 (165):148-153.
10. Маторин С.И., Жихарев А.Г. 2018. Общесистемные закономерности как содержательные элементы системной теории, основанной на системно-объектном подходе. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: экономика, информатика, 45(2): 372-385.
11. Маторин С.И., Жихарев А.Г. 2018. Формализация системно-объектного подхода «Узел-Функция-Объект». Прикладная информатика, 3(75):124-135.
12. Маторин С.И., Жихарев А.Г., Зимовец О.А. 2016. Системно-объектное моделирование адаптации эволюции экономических систем. Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права, 4(60):81-92.
13. Эшби Уильям Росс. 2017. Введение в кибернетику: Пер. с англ., под ред. В.А. Успенского. М.: УРСС: ЛЕНАНД, 430.
14. Abadi Martin and Luca Cardelli. 1996. A Theory of Objects. Springer-Verlag, 397.

15. Kondratenko, A.A., Matorin, S.I., Zhikharev, A.G., Nemtsev, A.N., and Riabtceva, I.N. 2017. Application of logical output means on ontologies to UFO models of subject domains. Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(5):1347-1354.

16. Matorin S.I., Zhikharev A.G. 2018. Calculation of the function objects as the systems formal theory basis. Advances in Intelligent Systems and Computing, 679:182-191.

17. Zhikharev A., Matorin S., Egorov I. 2018. Formal principles of system-object simulation modeling of technological and production processes. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 10(10):1806-1812.

18. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Kuznetsov A.V., Zherebtsov S.V., Tchekanov N.A. 2018. To the problem of the coefficient calculus of the nodal object in the system-object models. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 10(10 Special Issue):1813-1817.

19. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. 2016. The simulation modeling of systems taking into account their internal parameters change. International Journal of Pharmacy & Technology, 8 (4):26933-26945.

20. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. 2015. About perspectives of simulation techno-logical processes functioning with using system-object approach node-function-object. International Journal of Applied Engineering Research, 10 (12):31363-31370.

References

1. Yegorov I.A., Zhikharev A.G., Matorin S.I. 2018. K voprosu optimizatsii sistemno-ob"yektnykh imitatsionnykh modeley [On the issue of optimizing system-object simulation models]. Tezisy XIX Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh po matematicheskomu modelirovaniyu i informatsionnym tekhnologiyam: 61-62.

2. Zhikharev A.G., Matorin S.I. 2014. System-object modeling of technological processes. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika, 21 (192): 137-142 (in Russian).

3. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zaytseva N.O. 2015. System-object simulation of transport and technological processes. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika, 7 (204): 159-170 (in Russian).

4. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zaytseva N.O. 2015. System-object tools for simulation of technological processes and traffic flows. Iskusstvennyy intellekt i prinyatiye resheniy, 4:95-103 (in Russian).

5. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Mamatov Ye.M., Smorodina N.N. 2013. About the system-object method of representing organizational knowledge. Nauchnyye vedomosti BelGU. Ser. Informatika, 8(151):137-146 (in Russian).

6. Kaziyev V.M. 2007. Vvedeniye v analiz, sintez i modelirovaniye sistem. 2-ye izdaniye. [Introduction to analysis, syntel and system modeling. 2nd edition] M.: Binom. Laboratoriya znaniy, Seriya: Osnovy informatsionnykh tekhnologiy.

7. Kel'ton V., Lou A. 2004. Imitatsionnoye modelirovaniye. Klassika CS. — 3-ye izd [Simulation. Classic CS. - 3rd ed.]. SPb.:Piter, 487.

8. Kreyg Dzhon 2013. Vvedeniye v robototekhniku. Mekhanika i upravleniye: monogr [Introduction to robotics. Mechanics and control: monograph.]. M.: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 564.

9. Matorin S.I., Zhikharev A.G, Zaytseva N.O., Brusenskaya I.N. 2013. Simulation of traffic flows using the UFO-approach. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Istoriya. Politologiya. Ekonomika. Informatika, 22 (165):148-153 (in Russian).

10. Matorin S.I., Zhikharev A.G. 2018. System-wide laws as meaningful elements of a system theory based on a system-object approach. Nauchnyye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: ekonomika, informatika, 45(2): 372-385 (in Russian).

11. Matorin S.I., Zhikharev A.G. 2018. Formalization of the system-object approach “Node-Function-Object”. Prikladnaya informatika, 3(75):124-135 (in Russian).

12. Matorin S.I., Zhikharev A.G., Zimovets O.A. 2016. System-object modeling of adaptation of the evolution of economic systems. Vestnik Belgorodskogo universiteta kooperatsii, ekonomiki i prava, 4(60):81-92 (in Russian).

13. Eshbi Uil'yam Ross. 2017. Vvedeniye v kibernetiku. Pod red. V.A. Uspenskogo [An introduction to cybernetics]. M.: URSS: LENAND, 430 (in Russian).

14. Abadi Martin and Luca Cardelli. 1996. A Theory of Objects. Springer-Verlag, 397.

15. Kondratenko, A.A., Matorin, S.I., Zhikharev, A.G., Nemtsev, A.N., and Riabtceva, I.N. 2017. Application of logical output means on ontologies to UFO models of subject domains. Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(5):1347-1354.

16. Matorin S.I., Zhikharev A.G. 2018. Calculation of the function objects as the systems formal theory basis. Advances in Intelligent Systems and Computing, 679:182-191.

17. Zhikharev A., Matorin S., Egorov I. 2018. Formal principles of system-object simulation modeling of technological and production processes. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 10(10):1806-1812.

18. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Kuznetsov A.V., Zherebtsov S.V., Tchekanov N.A. 2018. To the problem of the coefficient calculus of the nodal object in the system-object models. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 10(10 Special Issue):1813-1817.

19. Zhikharev A.G., Matorin S.I., Zimovets O.A., Zhikhareva M.S., Rakov V.I. 2016. The simulation modeling of systems taking into account their internal parameters change. International Journal of Pharmacy & Technology, 8 (4):26933-26945.

20. Zhikharev, A.G., Matorin, S.I., Zaitseva, N.O. 2015. About perspectives of simulation technological processes functioning with using system-object approach node-function-object. International Journal of Applied Engineering Research, 10 (12):31363-31370.

Ссылка для цитирования статьи
For citation

Маматов Е.М., Боева А.В., Михайлюк Е.А., Ядута А.З. 2019. Применение системно-объектного имитационного моделирования в задачах разработки и апробации алгоритмов управления движением беспилотных транспортных средств. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 46 (4): 741-753. DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-4-741-753

Mamatov E.M., Boyeva A.V., Mikhaylyuk E.A., Yaduta A.Z. 2019. Application of system-objective simulation modeling in the problems of the development and approvation of almorities for management of motion of unmanned vehicles. Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies. 46 (4): 741-753 (in Russian). DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-4-741-753