

**А. В. Васильев**, ведущий конструктор, andrey@rtc.ru,  
ГНЦ РФ "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт  
робототехники и технической кибернетики", г. Санкт-Петербург

## Разработка компьютерной динамической модели и исследование прямолинейного движения транспортной системы малогабаритного мобильного робота

*Исследуются особенности мобильных мини-роботов (ММР) — малогабаритных роботов носимого типа, характерные размеры которых измеряются несколькими десятками сантиметров, а масса не превышает 15 кг. Исследуются и обосновываются особенности транспортных систем ММР с точки зрения подходов к методам их проектирования и математического описания. Приводятся результаты структурного синтеза транспортной системы ММР с реконфигурируемым шасси. Выполняется построение компьютерной модели транспортной системы в двух конфигурациях: гусеничной и колесной. Приводятся результаты экспериментальных исследований и сравнения полученных экспериментальных и расчетных данных.*

*Выявленные особенности транспортных систем ММР и методов построения компьютерных моделей с учетом этих особенностей позволили повысить точность и адекватность моделирования движения ММР по сравнению с известными подходами, применяемыми при расчетах более крупных аналогов.*

**Ключевые слова:** мобильный робот, мобильный мини-робот, транспортная система, реконфигурация, шасси, компьютерная модель, моделирование, экспериментальные исследования

### Введение

Мобильная робототехника — одно из наиболее активно развивающихся направлений экстремальной робототехники. Мобильные роботы (МР) предназначены для доставки в рабочую зону специального (технологического, манипуляционного) оборудования в целях выполнения функциональных задач на удалении от центра управления. Общая классификация МР приводится в работах [1, 2]. Любой МР может быть представлен в виде совокупности трех основных частей: системы управления и двух исполнительных подсистем — транспортной и специальной [3, 4].

Технические решения, принятые при создании транспортной системы, во многом влияют как на конечный облик всего МР, так и на его функциональные возможности, способность к адаптации к условиям движения, энергозатраты на движение и пр. Обоснованность этих решений играет ключевую роль при создании МР. Особенно это актуально для роботов мини- и микрогабаритности [1, 2], к транспортным системам которых предъявляются более высокие требования по проходимости ввиду их малых собственных размеров [5, 6]. Актуальной задачей в настоящее время [8–10] является разработка универсальной платформы для мобильных мини-роботов (ММР) — роботов носимого класса

массой от 7 до 15 кг [1, 2, 5], предназначенных для решения разведывательных и ряда других задач в городских условиях. Особенности и назначение ММР описаны в работах [5–9].

К преимуществам подобных роботов относятся:

- компактные размеры и небольшая масса;
- возможность оперативной доставки и развертывания;
- малозаметность и высокая подвижность.

Главная задача при создании таких роботов заключается в обеспечении их функционирования в недетерминированной среде на урбанизированной территории [8, 9], характеризуемой препятствиями, соизмеримыми или превосходящими собственные размеры робота.

Актуальными задачами при этом являются: во-первых, обоснованное структурное построение транспортной системы ММР, позволяющей роботу двигаться через такие препятствия; во-вторых, проведение достоверных расчетов кинематических силовых и энергетических характеристик элементов транспортной системы робота в целях подтверждения либо уточнения параметров приводов, механических передач, ходовой части. Решение первой задачи требует разработки соответствующей методики синтеза рационального схемно-конструктивного решения реализации шасси ММР исходя из заданных ограничений

(требований). Решение второй задачи требует построения математических и компьютерных моделей, которые бы обеспечили достаточную для целей проектирования точность расчетов.

Исследование вопросов теории и практики создания колесных и гусеничных машин, а также МР различного назначения показывает, что существующие методы расчета и подходы, используемые при их создании, не могут быть просто формально перенесены на малогабаритные транспортные системы мини-роботов [11], которые обладают рядом особенностей, отличающих их от более крупных аналогов. Среди таких особенностей: небольшие размеры всех элементов приводной и ходовой частей, обуславливающие различия в характере взаимодействия с опорной поверхностью; особенности, связанные с необходимостью передвижения в среде с макропрепятствиями; необходимость более точного учета внутренних потерь в элементах транспортной системы, которые начинают играть существенную роль на фоне полезных сил.

В настоящей статье, являющейся продолжением работ [12—14], предлагается подход к разработке математической и компьютерной моделей транспортной системы ММР с учетом выявленных особенностей описания малогабаритных транспортных систем в целях повышения адекватности моделей при проведении проектных работ.

### Схемотехнические решения транспортной системы

Анализ условий функционирования и требований по назначению ММР [5, 6, 8, 9] позволяет сформулировать следующий комплекс основных требований:

- обеспечение минимально возможных габаритных размеров и массы (требование транспортировки (носимости) ММР одним человеком в руках или специальной укладке);
- функционирование в городской среде внутри и снаружи зданий;
- продолжение функционирования (движения) после опрокидывания;
- обеспечение максимальных возможностей по увеличению высоты визирования бортовых телекамер;
- преодоление пороговых препятствий высотой 250...300 мм;
- преодоление канав (горизонтальных щелей) шириной до 300 мм;
- движение по лестничным маршам;
- обеспечение возможности установки на робот дополнительного оборудования — модулей различного функционального назначения (модуля ориентации обзорной телекамеры, манипулятора, модуля автономной навигации, различных полезных нагрузок и т. п.).

Представленные требования являются исходными данными для проектирования транспортной системы ММР и задают ряд ограничений, которые необходимо учитывать.

Первоочередная задача состоит в принципиальном определении структурно-кинематической схемы (СКС) шасси, которая удовлетворяла бы заданным ограничениям, и нахождении всех ее геометрических параметров [15]. Такая СКС должна обладать высокими адаптационными способностями к поверхности движения с препятствиями и соответствовать предъявляемым функциональным требованиям.

Существует огромное множество вариантов схемной реализации шасси МР [16—18], в целях анализа которых в работах [12, 13] было проведено исследование принципов построения, тенденций развития шасси МР, а также их систематизация с точки зрения способностей к адаптации к изменяющимся условиям передвижения. Было показано, что наибольшими адаптационными способностями обладают системы, способные к геометрической и структурной реконфигурации. Именно такие системы наиболее оправданы для рассматриваемого класса МР.

Для осуществления обоснованного выбора схемного решения шасси была разработана методика синтеза СКС, описанная в работе [14], которая заключается в сравнении возможных вариантов СКС по ряду критериев, составленных исходя из заданных ограничений. Эти критерии учитывают: требования минимизации массы и размеров ММР, функциональные требования по удобству внутренней компоновки, установки навесного оборудования, а также сохранения функционирования ММР после опрокидывания, требования по преодолению обозначенных типовых препятствий с одновременным обеспечением минимально возможных размеров.

По результатам проведенного в работе [14] анализа для транспортной системы ММР была выбрана шестигусеничная схема с формулой  $6Г2А^1$ , обладающая высокими характеристиками по геометрической реконфигурации, которые оцениваются коэффициентами возможного изменения длины шасси  $K_L$  и высоты шасси  $K_H$ , а также общим коэффициентом трансформации

$$K_{тр} = (L_p/L_t)(H_p/H_t) = K_L K_H, \quad (1)$$

где  $L_p$  — габаритная длина шасси в разложенном (рабочем) положении;  $L_t$  — габаритная длина шасси в сложенном (транспортном) положении;  $H_p$  — габаритная высота шасси в разложенном положении;  $H_t$  — габаритная высота шасси в сложенном положении.

<sup>1</sup> Буквенно-цифровые обозначения схем шасси приводятся в соответствии с работами [12, 13].

Данная схема по сравнению с другими вариантами показала наиболее высокие значения по разработанным критериям. В частности, сравнение возможностей по преодолению типовых препятствий оценивалось в относительном измерении с помощью коэффициента порогового препятствия

$$K_{пп} = H_{п}/H_{т}, \quad (2)$$

где  $H_{п}$  — высота преодолеваемого порогового препятствия,

и коэффициента препятствия типа "канавы"

$$K_{пк} = B_{к}/L_{т}, \quad (3)$$

где  $B_{к}$  — ширина преодолеваемой канавы.

Значения указанных коэффициентов для схемы 6Г2А приведены в табл. 1.

Таблица 1

$K_{Lmax}$	$K_{Hmax}$	$K_{тр}$	$K_{пп}$	$K_{пк}$
1,8	6,2	3,9	3,0	1,0

Высокие значения этих коэффициентов указывают на возможность минимизации габаритных размеров транспортной системы и ММР в целом при сохранении требуемых функциональных свойств и показателей проходимости.

Дополнительно проведенный анализ позволил сделать вывод о возможности конструктивного исполнения схемы 6Г2А в реконфигурируемом варианте, когда она может быть легко переобстроена в колесную схему 4К2Г.

Таким образом, структурно-кинематическая схема шасси исследуемой транспортной системы, показанная на рис. 1, включает две конфигурации: гусеничную 6Г2А и колесную 4К2Г.

### Структурное построение транспортной системы

Транспортная система любого МР представляет собой совокупность элементов, непосредственно участвующих в процессе последовательного преобразования энергии бортового источника питания в механическую энергию движения [19]. Этот процесс может быть разбит на три стадии: распределение, преобразование и потребление энергии. В качестве потребителя выступает ходовая часть, которая рассматривается во взаимодействии с опорным основанием.

Отличительной особенностью рассматриваемой транспортной системы ММР является разветвление ее электромеханической системы

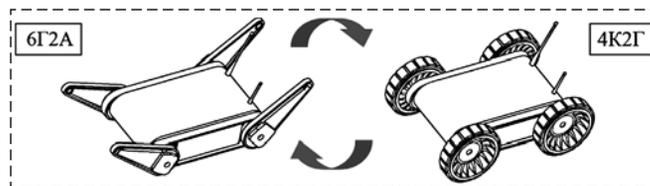


Рис. 1. Структурно-кинематическая схема шасси ММР

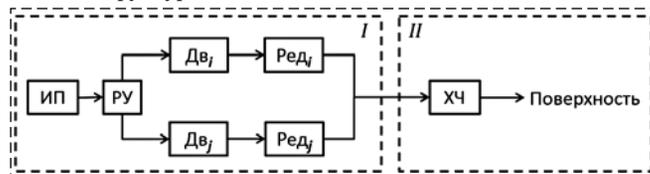


Рис. 2. Структурная схема транспортной системы ММР:

ИП — источник питания; РУ — распределительное устройство; Дв — двигатель; Ред — редукторы (механические передачи); ХЧ — ходовая часть; I — приводная подсистема; II — исполнительная подсистема

на две относительно независимые параллельные ветви (части): подсистему  $i$ -х тяговых приводов (ТП) и подсистему  $j$ -х приводов механизмов изменения геометрии (МИГ).

Для рассматриваемого примера транспортной системы

$$i = \{1; 2\}, j = \{1; 2\}. \quad (4)$$

Структурная схема транспортной системы показана на рис. 2.

Подсистема управления исполнительными приводами транспортной системы условно отделена от нее, так как транспортная система рассматривается как чисто электромеханическая составляющая ММР, когда управляющие воздействия на нее (уровни питающих напряжений на двигателях) считаются известными и рассматриваются в качестве исходных данных анализа [19]. В этом случае двигатели приводов считаются подсоеди-

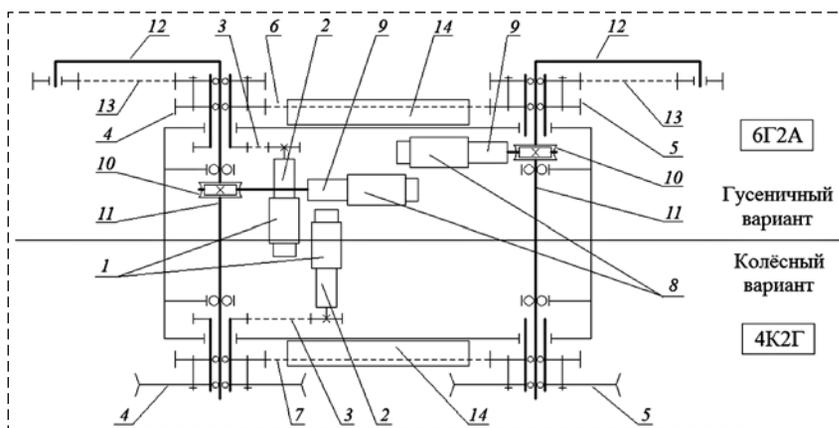


Рис. 3. Структурно-кинематическая схема транспортной системы ММР:

1 — электродвигатель ТП; 2 — планетарный редуктор ТП; 3 — зубчатая ременная передача ТП; 4 — колесо переднее; 5 — колесо заднее; 6 — основная гусеница; 7 — бортовая ременная передача; 8 — электродвигатель привода МИГ; 9 — планетарный редуктор МИГ; 10 — червячный редуктор МИГ; 11 — вал МИГ; 12 — рычаг МИГ; 13 — дополнительная гусеница; 14 — бортовой источник питания

ненными непосредственно к источнику питания через простейшее коммутирующее устройство, обеспечивающее подключение нужного двигателя к источнику в нужный момент времени.

Каждый из приводов представлен электродвигателем и совокупностью механических передач, состав которых определяется в том числе из конструктивно-компоновочных решений всего ММР. Учитывая небольшие размеры мини-робота, важно отметить, что, компоновка всех его частей в целом способна существенно повлиять на состав компонентов транспортной системы [20] и должна проводиться уже на первых этапах формирования ее технического облика в целях проверки принципиальной реализуемости разработанных схемных решений с учетом определенных геометрических параметров.

На рис. 3 представлен один из возможных вариантов структурно-кинематической схемы транспортной системы, а на рис. 4 — соответствующая этому варианту компоновочная схема ММР.

### Особенности построения компьютерной модели транспортной системы

Компьютерная модель транспортной системы строится на основе структуры, показанной на рис. 2, и включает блоки, описывающие функционирование каждого из входящих в нее элементов (звеньев). Особенностью разработанной модели является ее деление на две взаимодействующие друг с другом части, условно обозначенные на рис. 2 как приводная (*I*) и исполнительная (*II*) подсистемы.

Структура построения компьютерной модели с учетом этой особенности показана на рис. 5.

Первая из указанных частей имеет вид "источник питания — двигатели — редукторы" и характеризуется единственной степенью подвижности для каждого из  $i$ -х или  $j$ -х приводов. Вторая часть имеет вид "ходовая часть — поверхность" и, по сути, в терминах теории автоматического управления представляет собой объект управления [21], характеризуемый сложным взаимодействием с внешней средой (поверхностью движения). Взаимодействие между двумя частями модели осуществляется через внешнюю DLL-библиотеку. Задание внешних условий нагружения (тип и геометрия поверхности), а также всех параметров модели и управляющих воздействий осуществляется через модель исполнительной

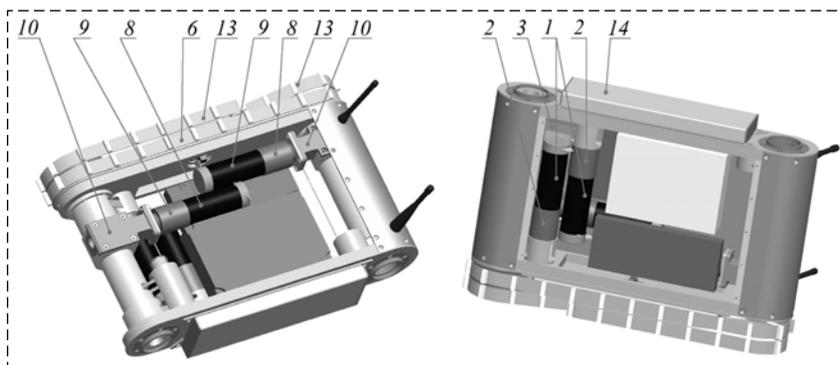


Рис. 4. Трехмерная компоновочная схема транспортной системы и ММР в целом (обозначения см. рис. 3)

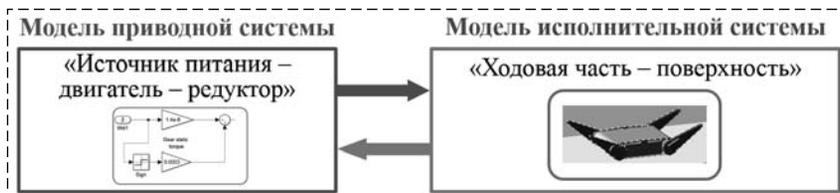


Рис. 5. Структура компьютерной модели транспортной системы ММР

части, которая строится в программном комплексе имитационного моделирования динамики сложных механических систем.

Преимущества представленного метода построения компьютерной модели заключаются в наглядности получаемых результатов и возможности анализа любой из кинематических или динамических характеристик элементов модели, возможности моделирования общих случаев движения, автоматическом учете изменяющейся в ходе движения геометрической конфигурации транспортной системы и соответствующих инерционных характеристик, возможности оперативного задания геометрии опорной поверхности.

При построении модели приняты следующие допущения: параметры однотипных приводов в пределах каждой электромеханической подсистемы имеют одинаковые значения; рассматривается взаимодействие только с твердыми недеформируемыми основаниями; параметры и характеристики, описывающие работу и взаимодействие с опорной поверхностью обоих бортов ходовой части, также одинаковы.

На рис. 6 представлена общая блок-схема приводной части компьютерной модели транспортной системы ММР.

Поскольку в рамках настоящей статьи рассматривается только исследование прямолинейного движения ММР с фиксированной геометрической конфигурацией, т. е. приводы МИГ не задействованы, на рис. 6 приводится только та часть модели, которая относится к ТП. Модель приводной части подсистемы МИГ имеет вид, аналогичный ТП. На рис. 6 показаны только входные воздействия на приводы МИГ, обозначенные  $Ue3$  и  $Ue4$ .

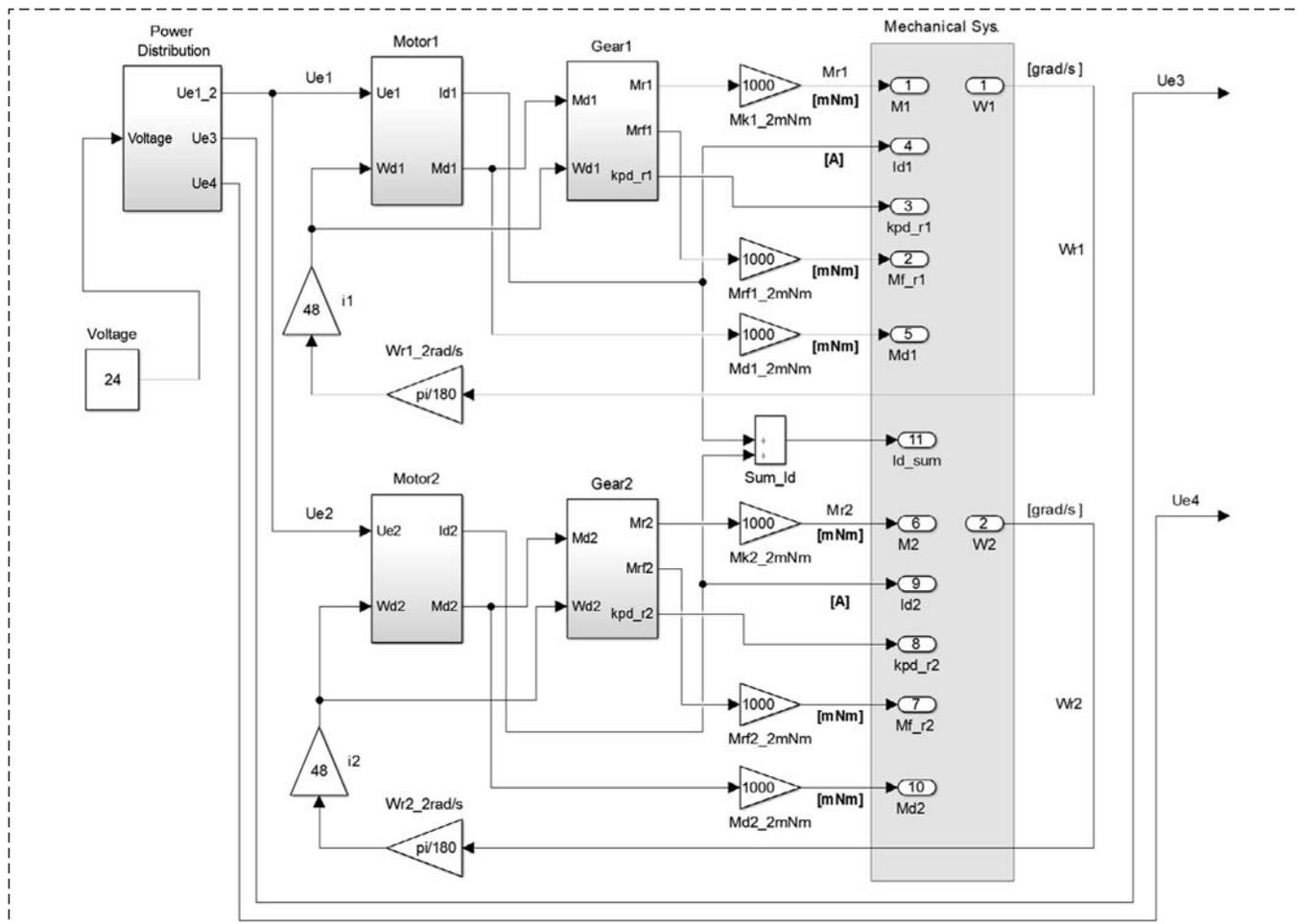


Рис. 6. Компьютерная модель приводной части транспортной системы МРР

Рассмотрим подробнее блоки, входящие в представленную на рис. 6 модель транспортной системы.

1. Блок "Voltage" устанавливает задающее воздействие в виде фиксированного значения напряжения питания на приводах (Ue1 для ТП, Ue3 и Ue4 для приводов МИГ). Применение в рамках настоящей работы вместо модели бортовой аккумуляторной батареи (АКБ) простейшего блока, задающего фиксированное напряжение, обусловлено спецификой предлагаемого в работе исследования, целью которого в том числе был анализ характера влияния на рассчитываемые характеристики скоростных режимов работы транспортной системы.

2. Блок "Power Distribution" имитирует работу простейшего распределительного устройства, подключающего к питанию тот или иной привод в заданный момент времени.

3. Блоки "Motor1" и "Motor2", схема которых показана на рис. 7, представляют собой модели электродвигателей ТП. Их построение выполнено на основе известных математических моделей, описывающих динамику двигателей постоянного тока [21, 22].

Однако особенностью моделей в сравнении с известными подходами является добавление момента  $M_{df}$  сил внутреннего сопротивления двига-

теля в форме, включающей зависимость от скорости вращения вала двигателя и имеющей вид

$$M_{df} = M_{df0} \text{sign} \dot{\phi}_d + K_{fd} \dot{\phi}_d, \quad (5)$$

где  $M_{df}$  — момент сухого трения;  $\dot{\phi}_d$  — угловая скорость вала двигателя;  $K_{fd}$  — коэффициент вязкого трения [мН·м·с]. Вид этой зависимости подтвержден экспериментальной верификацией представленной на рис. 7 модели электродвигателя и соответствует описанию модели вязкого трения в миниатюрных двигателях постоянного тока [22]. В представленной модели отсутствует учет инерции вращающихся масс, разгоняемых электродвигателями, так как учет приведенных моментов инерции выполнен в модели исполнительной части транспортной системы МРР.

4. Блоки "Gear1" и "Gear2", структура которых показана на рис. 8, моделируют редукторную часть ТП.

Отличительная особенность моделей состоит в учете непостоянства момента внутренних потерь, КПД редуктора и зависимости момента собственного трения в редукторе от скоростных факторов.

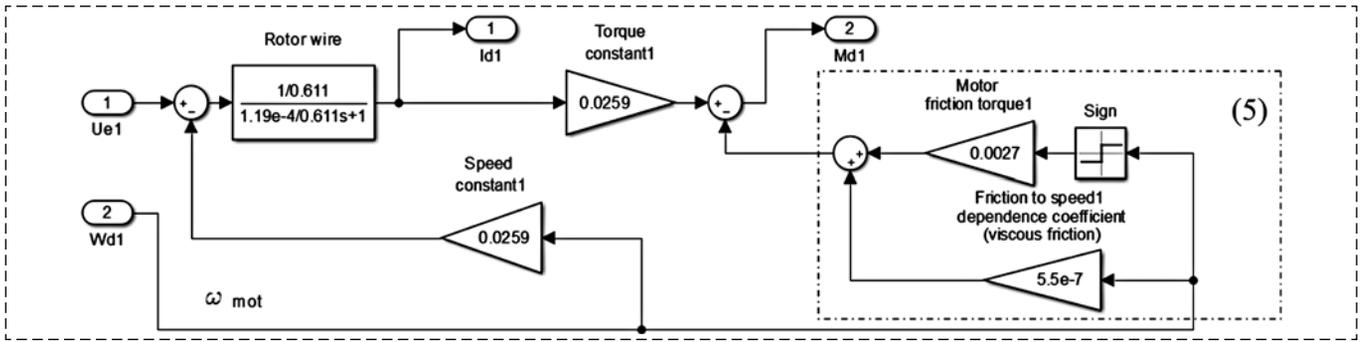


Рис. 7. Компьютерная модель электродвигателей (блоки "Motor")

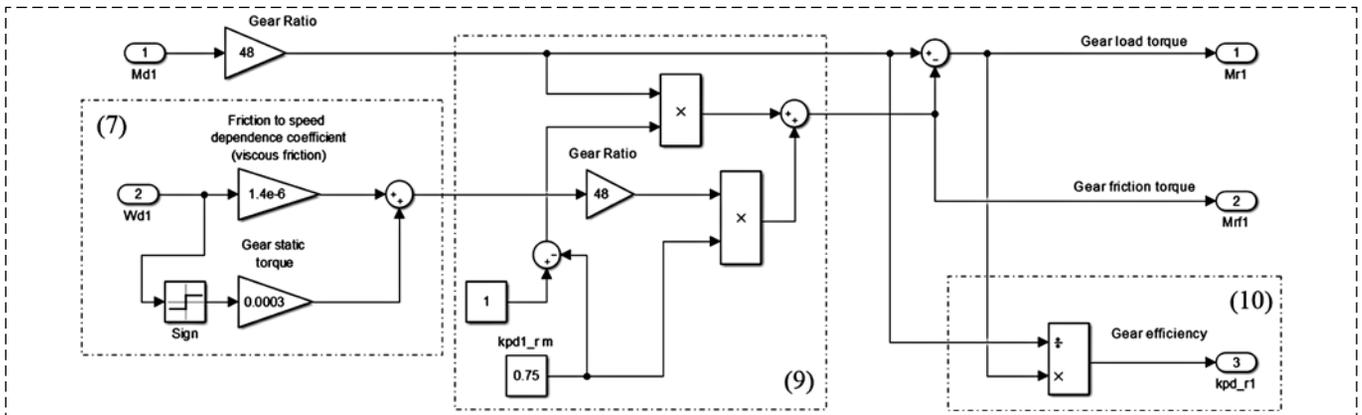


Рис. 8. Компьютерная модель редукторной части тягового привода (блоки "Gear1" и "Gear2")

При расчетах и моделировании транспортных машин и МР потери в механических передачах традиционно учитываются как постоянные величины, рассчитанные для некоторых номинальных значений внешней нагрузки [19, 21, 23, 24]. Это является допустимым при рассмотрении режимов работы передач на нагрузках, равных или превосходящих номинальные. Однако строго говоря при движении МР нагрузки на входящие в состав их транспортных систем механические передачи меняются в гораздо более широких пределах, что требует более точного учета характеристик механических потерь в редукторах на режимах частичных нагрузок.

Известно, что внутренние потери редуктора складываются из потерь холостого хода и потерь, пропорциональных внешней нагрузке, и могут быть описаны в виде [25]

$$\eta_p = \frac{M_d - M_{тр.хх}}{M_d} \eta_{рм} \quad \text{или} \quad \eta_p = \left(1 - \frac{M_{тр.хх}}{M_d}\right) \eta_{рм}, \quad (6)$$

где  $\eta_p$  — КПД редуктора;  $M_d$  — момент на входном валу редуктора (выходном валу двигателя);  $M_{тр.хх}$  — момент потерь холостого хода редуктора, приведенный к входному валу;  $\eta_{рм}$  — КПД, учитывающий потери, пропорциональные внешней нагрузке.

Характеристики КПД редукторов в зависимости от выходного момента  $M_{ред}$ , построенные по

формуле (6), имеют вид, показанный на рис. 9. Форма этих зависимостей широко известна из теории деталей машин [19], а их количественное описание хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований, проведенных на редукторах и передачах, используемых в составе рассматриваемой транспортной системы.

Экспериментальные исследования элементов малогабаритных транспортных систем ММР показали, что существенное влияние на суммарное значение внутренних потерь оказывает составляющая потерь в редукторах  $M_{тр.хх}$  — момент потерь холостого хода редуктора, который описывается зависимостью

$$M_{тр.хх} = M_{рf0} \text{sign} \dot{\phi}_d + K_{fp} \dot{\phi}_d, \quad (7)$$

где  $M_{рf0}$  — момент сухого трения, измеренный на входном валу;  $\dot{\phi}_d$  — угловая скорость входного вала редуктора;  $K_{fp}$  — коэффициент вязкого трения.

Суммарный момент внутреннего сопротивления в редукторе, приведенный к выходному валу, определяется как

$$M_{fред.вых} = M_d i_{ред} (1 - \eta_p), \quad (8)$$

где  $i_{ред}$  — передаточное отношение редуктора.

Тогда из уравнения (8) с учетом (6) получаем

$$M_{fред.вых} = M_d i_{ред} (1 - \eta_{рм}) + M_{тр.хх} i_{ред} \eta_{рм}. \quad (9)$$

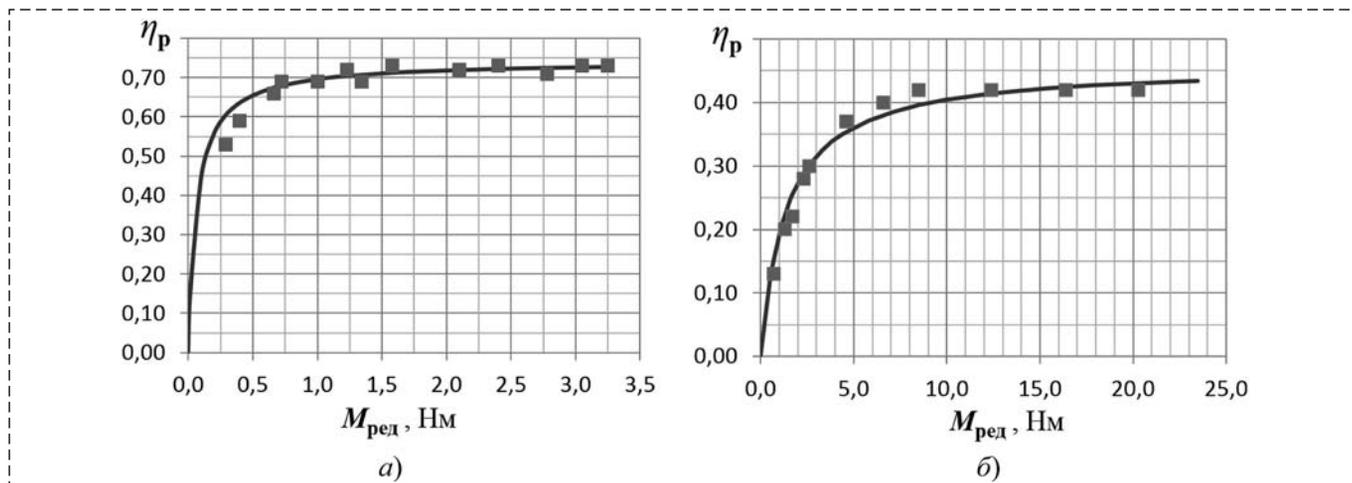


Рис. 9. Зависимости КПД редукторов от момента нагрузки:

*a* — двухступенчатого планетарного редуктора Махон GP32С ( $i = 23$ ); *б* — червячной передачи (модуль  $m = 1$ ,  $i = 30$ ); сплошные линии — расчет по формуле (6), метки в виде квадратов — экспериментальные данные

Формула (9) представляет потери в редукторе как сумму потерь, пропорциональных моменту нагрузки (первое слагаемое), и потерь холостого хода (второе слагаемое).

КПД редуктора

$$\eta_p = M_{ред} / M_d i_{ред} \quad (10)$$

5. Блок "Mechanical Sys." представляет собой подсистему входных-выходных параметров, используемых для взаимодействия с моделью исполнительной части транспортной системы. В качестве таких параметров каждого  $i$ -го привода в порядке их следования на рис. 6 выступают:  $M_i$  — выходной момент  $i$ -го привода;  $I_{di}$  — ток электродвигателя;  $k_{pd\_ri}$  — КПД редукторной части привода;  $M_{f\_ri}$  — момент внутренних потерь в редукторной части;  $M_{di}$  — механический момент на валу электродвигателя;  $I_{d\_sum}$  — суммарный ток электродвигателей ТП;  $W_i$  — обратная связь по угловой скорости исполнительного узла  $i$ -го привода.

Значения экспериментально определенных параметров модели, входящих в уравнения (5), (7) и (9), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальной идентификации параметров приводной части модели

Параметр	$M_{д/0}$	$K_{fd}$	$M_{р/0}$	$K_{fp}$	$\eta_{pm}$
Единицы измерения	мН·м	$\times 10^{-3}$ мН·м·с	мН·м	$\times 10^{-3}$ мН·м·с	—
Значение	2,7	0,55	0,3	1,4	0,75

На рис. 10 представлен внешний вид имитационной компьютерной модели исполнительной части транспортной системы ММР. Модель включает в себя следующие компоненты: корпус; две зубчатые ременные передачи с грунтозацепами, имитирующие основные гусеницы ММР; четыре рычага; четыре зубчатые ременные передачи с грунтозацепами, имитирующие дополнительные гусеницы ММР в конфигурации 6Г2А, и четыре колеса, играющие роль опорных элементов в конфигурации 4К2Г.

Геометрические размеры и соотношения между компонентами модели соответствуют параметрам, определенным в работе [14] в результате параметрического синтеза СКС шасси на основе

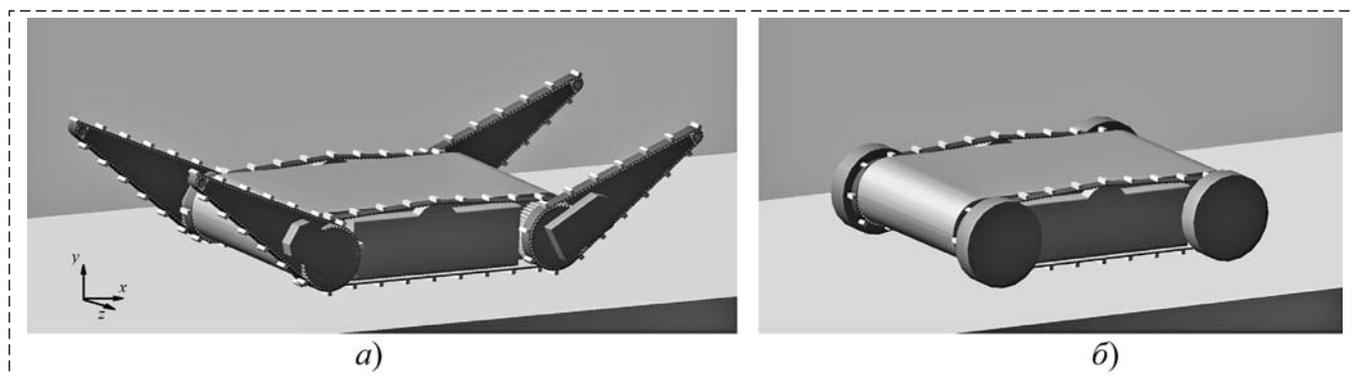


Рис. 10. Компьютерная модель транспортной системы ММР:

*a* — в гусеничной конфигурации 6Г2А; *б* — в колесной конфигурации 4К2Г

оптимизации по критерию минимизации размеров шасси при сохранении заданных параметров геометрической проходимости.

Основные геометрические параметры модели приведены в табл. 3.

Массоинерционные параметры составных частей модели заданы по результатам конструкторской проработки в среде САД-моделирования. Определение суммарного момента инерции вра-

Таблица 3

**Геометрические параметры модели**

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Значение
Габаритная длина в транспортном положении	$L_T$	мм	390
Габаритная высота в транспортном положении	$H_T$	мм	87,4
Ширина шасси по движителю	$B_T$	мм	278
База	$L_6$	мм	300
Длина рычагов	$l_p$	мм	205
Максимальная длина опорной поверхности движителя	$L_{6max}$	мм	705
Условный диаметр по гусеничному обводу: — основных и дополнительных шкивов	$D$	мм	87,4
— направляющих роликов	$d$	мм	27,0
Диаметр колеса	$D_k$	мм	100
Высота корпуса	$H_b$	мм	76
Ширина корпуса	$B_b$	мм	208
Дорожный просвет в конфигурации: — 6Г2А — 4К2Г	$h_g$	мм	10,7 17

Таблица 4

**Массоинерционные параметры модели**

Параметр	$m, г$	$J_z, кг \cdot мм^2$	Применимость	
			6Г2А	4К2Г
Шкив основной гусеницы	82	75	+	+
Шкив дополнительной гусеницы	104	140	+	+
Дополнительные вращающиеся детали, связанные с ведущим колесом (шкивом)	0,0*	$5,76 \cdot 10^3$	+	+
Колесо	86	152	—	+
Рычаг	470	1470	+	—
Гусеница основная	40	1,59	+	+
Гусеница дополнительная	25	1,00	+	—
Корпус	$10,3 \cdot 10^3$	$1,19 \cdot 10^5$	+	+
Робот в конфигурации 6Г2А	$13,1 \cdot 10^3$	$2,51 \cdot 10^5$	+	+
Робот в конфигурации 4К2Г	$11,5 \cdot 10^3$	$1,45 \cdot 10^5$	+	+

\* Массы компонентов учтены в массе корпуса.

щающихся масс, приведенного к оси ведущего колеса (шкива), выполняется по формуле [26]

$$J'_{пр} = J_d i_{ред}^2 \eta_{рм} + J_k, \quad (11)$$

где  $J_d$  — момент инерции деталей, вращающихся с одной скоростью с валом двигателя;  $J_k$  — момент инерции деталей, вращающихся с одной скоростью с колесом (шкивом).

В табл. 4 приведены расчетные значения массоинерционных параметров модели в виде масс  $m$  отдельных компонентов и моментов инерции относительно оси вращения (ось  $z$  на рис. 10, а).

**Исследование прямолинейного движения транспортной системы ММР**

В данной работе рассматриваются результаты моделирования частного случая движения транспортной системы ММР, а именно движение по поверхностям с различными углами наклона. Такой режим является классическим расчетным случаем при проектировании транспортной техники, позволяющим исследовать тягово-сцепные свойства системы при движении в различных условиях [23].

Целью моделирования является исследование процесса разгона и равномерного движения транспортной системы на различных режимах нагружения, определение значений действующих на ее элементы нагрузок, затрат энергии на движение, а также характера влияния на эти величины текущего значения угла наклона поверхности и веса робота с учетом полезного груза, т. е. оценка нагрузочной способности транспортной системы.

Режим нагружения (условия испытаний) складывается из задания угла наклона поверхности, массы дополнительного груза (т. е. суммарной массы робота с учетом груза), скоростного режима (напряжения питания на приводах), типа поверхности движения.

В качестве поверхности в настоящей работе использовалась тестовая модельная поверхность с относительно низкими сцепными свойствами (коэффициент сцепления около 0,32...0,35), что позволяло исследовать в том числе режимы движения с буксованием (проскальзыванием) движителей транспортной системы.

Универсальной характеристикой энергетических затрат приводов является суммарный потребляемый ток электродвигателей  $I_\Sigma$ . На рис. 11 показаны характерные графики суммарного тока для двух конфигураций транспортной системы — шестигусеничной 6Г2А и колесной 4К2Г. Данные графики получены для случая движения транспортной системы по горизонтальной поверхности при напряжении питания электродвигателей 33 В. Графики, полученные в ходе моделирования при других расчетных случаях

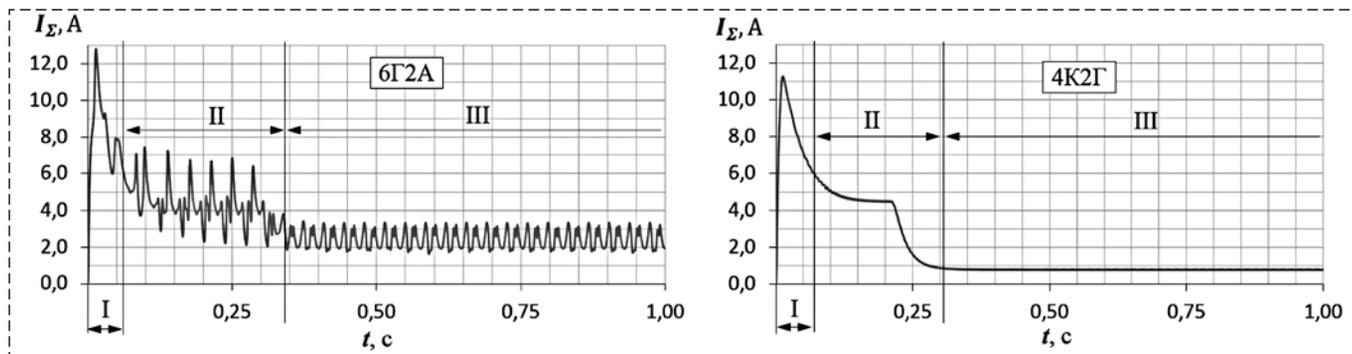


Рис. 11. Характерные графики суммарного тока в приводах

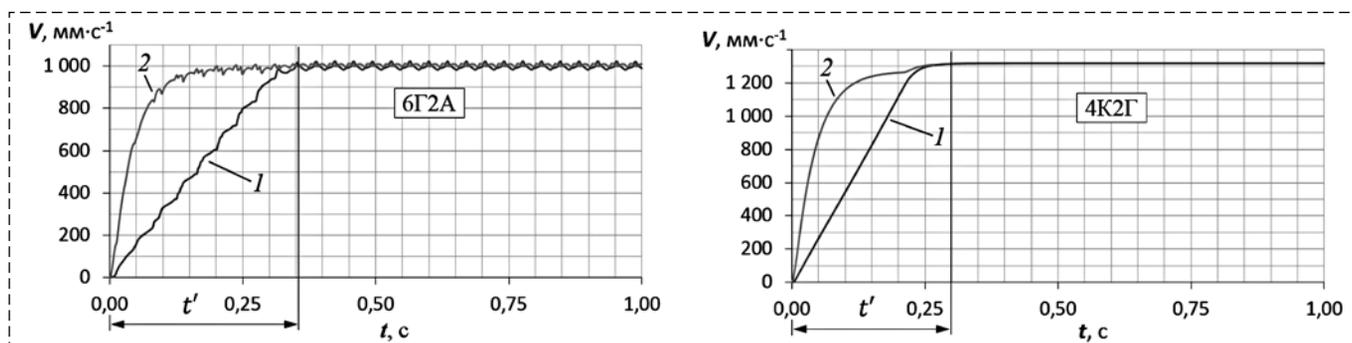


Рис. 12. Характерные графики теоретической и действительной скоростей движения ММР:

1 —  $V_x$ ; 2 —  $V_{x^{teor}}$ ;  $t'$  — время разгона

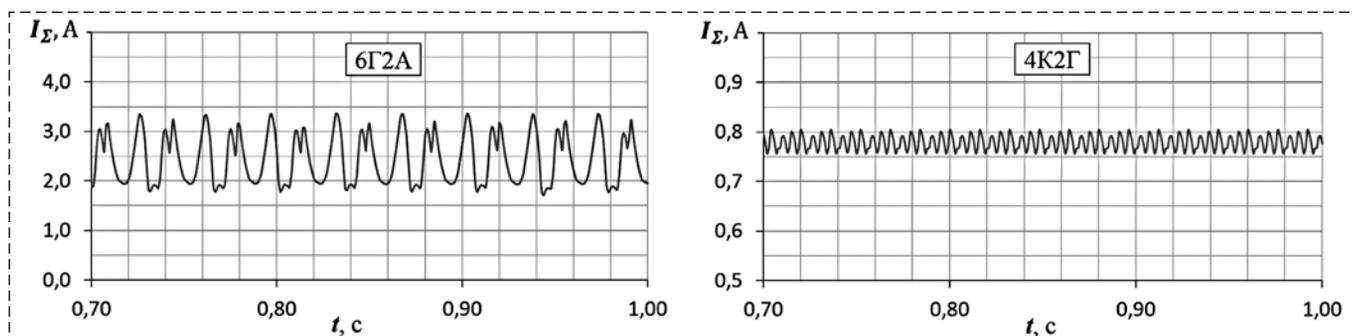


Рис. 13. Графики суммарного тока в приводах при равномерном движении транспортной системы

(другие напряжения, различные углы наклона поверхности, наличие полезного груза), имеют схожий вид.

На графиках хорошо различимы три зоны, характеризующие следующие этапы движения: I — трогание; II — разгон с буксованием; III — равномерное движение. О наличии буксования говорит повышенное потребление в зоне II, т. е. наличие дополнительных потерь энергии, а также сравнение графиков реальной (действительной) скорости движения робота  $V_x$  и теоретической скорости  $V_{x^{teor}}$ , определяемой по скоростям вращения колес в соответствии с формулой

$$V_{x^{teor}} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{\phi}_{ki}}{n} r_k, \quad (12)$$

где  $\dot{\phi}_{ki}$  — угловая скорость колеса  $i$ -го ТП;  $r_k$  — радиус качения;  $n$  — число ТП.

Сравнение графиков  $V_x$  и  $V_{x^{teor}}$ , полученных для тех же расчетных случаев, что и графики на рис. 11, представлено на рис. 12.

Графики  $I_\Sigma$ ,  $V_x$  и  $V_{x^{teor}}$  на этапах равномерного движения характеризуются значительными колебаниями, особенно сильно выраженными для гусеничной конфигурации 6Г2А (для конфигурации 4К2Г в масштабе рис. 11 и рис. 12 эти колебания не заметны, так как имеют на порядок меньшую амплитуду). Графики суммарного энергопотребления по рис. 11 укрупненно показаны на рис. 13.

Анализ результатов моделирования для схемы 6Г2А показывает, что эти колебания вызваны неравномерностью движения гусениц, а их период точно согласуется с шагом  $S$  расположения грунтозацепов и определяется формулой

$$T_{si} = \frac{S}{\dot{\phi}_{ki} r_k}. \quad (13)$$

Для схемы 4К2Г формула (13) также справедлива, если под  $S$  в ней понимать шаг расположения рабочих зубьев ремня.

Причина более значительных колебаний для конфигурации 6Г2А заключается в характере взаимодействия движителя с поверхностью. Картина этого взаимодействия различна для гусеничной и колесной схем. Для схемы 4К2Г взаимодействие движителей с поверхностью происходит через четыре опорные точки, а основные гусеницы играют роль лишь передаточных механизмов, не нагруженных нормальными реакциями. Для схемы 6Г2А каждая гусеница взаимодействует с поверхностью через грунтозацепы, передавая далее эти нагрузки на передний и задний шкивы и нижние направляющие. При этом, как показывает совместный анализ видеозаписей (анимаций) движения и графиков, полученных в ходе моделирования, пики колебаний тока приходятся на моменты ударов грунтозацепов, входящих в данный момент в зацепление с поверхностью. С этим же связаны и колебания скоростей колес и линейной скорости робота. Однако в результате оценки установлено, что амплитуда этих колебаний не превышает 2 %.

Результаты оценки энергетических затрат на движение ММР по поверхностям с различными углами наклона  $\alpha$  показаны на рис. 14 в виде диаграмм, иллюстрирующих характер распределения мощностей по составным звеньям транспортной системы. Для сравнения приведены результаты расчетов для двух крайних случаев: режима максимальной нагрузки — при максимальном напряжении питания, которое для рассматриваемого ММР составило 33 В, и максимальной массе полезного груза, равной 8 кг, и режима условно минимальной нагрузки — при напряжении питания 15 В и нулевой массе полезного груза.

Значения мощностей на звеньях, соответствующие графикам на рис. 14, определены по следующим формулам [19]:

$$P_3 = U_e I_\Sigma = U_e \sum_{i=1}^n I_{di}, \quad (14)$$

где  $P_3$  — суммарная мощность, потребляемая приводами от источника;  $U_e$  — напряжение питания;  $I_{di}$  — ток электродвигателя  $i$ -го привода;

$$N_d = \sum_{i=1}^n M_{di} \dot{\phi}_{di}, \quad (15)$$

где  $N_d$  — суммарная мощность на электродвигателях ТП;

$$N_k = \sum_{i=1}^n M_{ki} \dot{\phi}_{ki}, \quad (16)$$

где  $N_k$  — суммарная мощность на ведущих колесах;  $M_{ki}$  — момент на ведущем колесе (шкиве), связанном с  $i$ -м приводом;

$$N_V = \dot{x} \Psi g (M + M_r) = V_x (f \cos \alpha + \sin \alpha) G_p, \quad (17)$$

где  $N_V$  — суммарная мощность сил сопротивления движению;  $\dot{x}$  и  $V_x$  — линейная скорость движения центра масс ММР вдоль оси  $x$ ;  $\Psi$  — коэффициент сопротивления движению на подъем [23];  $M$  — масса ММР;  $M_r$  — масса полезного груза;  $f$  — коэффициент сопротивления движению;  $\alpha$  — угол наклона поверхности;  $G_p$  — общий вес робота с грузом.

Потери в звеньях транспортной системы определяются как

$$\begin{aligned} \zeta_d &= 1 - N_d / P_3 = 1 - \eta_d; \\ \zeta_p &= 1 - N_k / N_d = 1 - \eta_p; \\ \zeta_{xч} &= 1 - N_V / N_k = 1 - \eta_{xч}; \\ \zeta_{тс} &= 1 - N_V / P_3 = 1 - \eta_{тс}, \end{aligned} \quad (18)$$

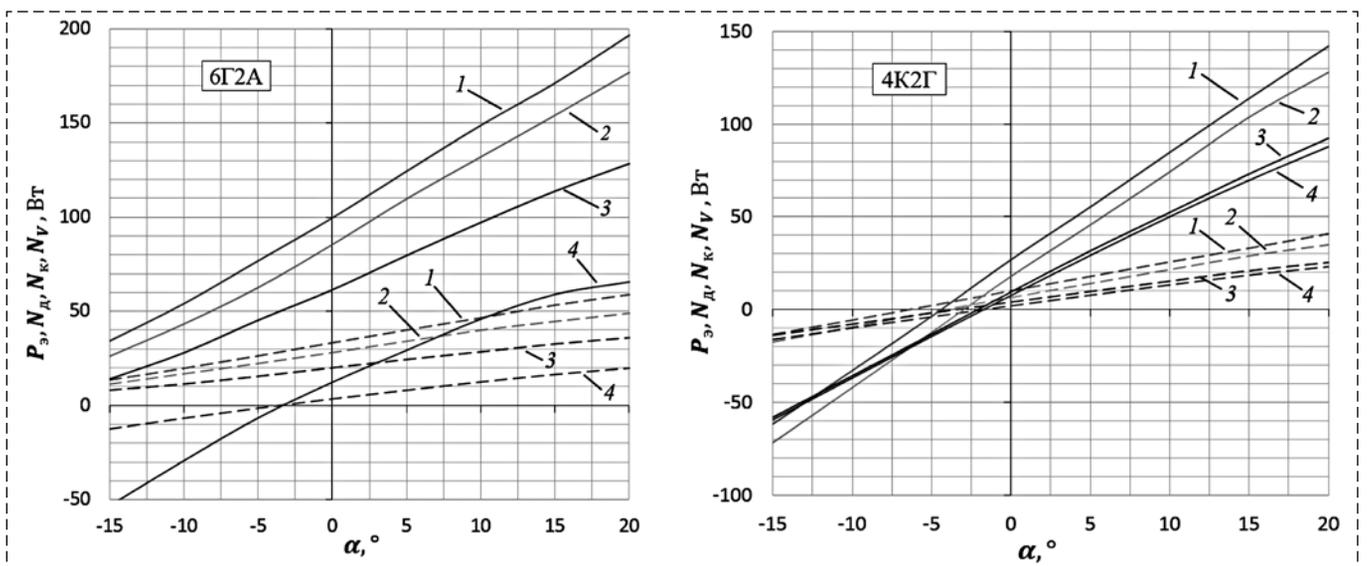


Рис. 14. Структура энергозатрат транспортной системы ММР в конфигурациях 6Г2А и 4К2Г при прямолинейном движении:

--- —  $U_e = 15$  В,  $M_r = 0$  кг; — —  $U_e = 33$  В,  $M_r = 8$  кг; 1 —  $P_3$ ; 2 —  $N_d$ ; 3 —  $N_k$ ; 4 —  $N_V$

где  $\zeta_d$  и  $\eta_d$  — потери и КПД двигателей;  $\zeta_p$  и  $\eta_p$  — потери и КПД механических передач;  $\zeta_{хч}$  и  $\eta_{хч}$  — потери и КПД ходовой части;  $\zeta_{тс}$  и  $\eta_{тс}$  — суммарные потери и суммарный КПД транспортной системы.

По полученным на рис. 14 картинам можно судить об эффективности как каждого из отдельных элементов системы, так и транспортной системы в целом. По сути, такие диаграммы являются своего рода "паспортом" рассматриваемой системы.

Например, из рис. 14 видно, что наибольшие потери происходят в механических передачах транспортной системы в обоих вариантах конфигураций и в ходовой части гусеничной конфигурации 6Г2А. Первые из них графически оцениваются разностью ( $N_d - N_k$ ), отнесенной к  $N_d$ , вторые — разностью ( $N_k - N_v$ ), отнесенной к  $N_k$ . При этом обращает на себя внимание "заваливание" характеристик мощности на двигателях  $N_v$  с ростом угла наклона поверхности, проявляющееся во всех режимах, но особенно заметное для гусеничной конфигурации 6Г2А при движении с большими скоростями при максимальном значении напряжения питания, составляющем 33 В. Такой характер обуславливается ростом

буксования, которое вызывает дополнительные потери в ходовой части.

Приблизительно прямолинейный вид характеристик  $P_э$ ,  $N_d$  и  $N_k$ , которые несколько расходятся друг относительно друга с ростом угла наклона поверхности, говорит об относительной стабильности КПД двигателей и механических передач, работающих на нагрузках, близких к номинальным значениям (рис. 14).

Общий анализ графиков на рис. 14 приводит к логичному выводу о более высокой эффективности колесной конфигурации 4К2Г. Расчетные значения суммарного КПД транспортной системы для конфигурации 4К2Г в 1,6...2,3 раза превысили соответствующие значения для конфигурации 6Г2А. Большая разница характерна для наименьших углов наклона, меньшая — для наибольших.

### Экспериментальные исследования

Для проверки достоверности проведенных компьютерных моделирований был выполнен комплекс экспериментальных исследований на макете ММР с геометрическими и массоинерционными параметрами, соответствующими разработанной компьютерной модели и по методике аналогичной виртуальным экспериментам. Задавалось движение транспортной системы ММР по тестовой поверхности с известными экспериментально определенными характеристиками при различных значениях напряжения питания. Режим нагружения транспортной системы задавался, как показано на рис. 15, путем изменения угла наклона поверхности и установки на ММР грузов различной массы.

В целях исследования непосредственно транспортной системы ММР элементы его бортовой системы управления (БСУ) были отключены от приводов. При этом питание самих электроприводов осуществлялось от внешнего стабилизированного источника питания, что позволяло задавать различные значения напряжения и контролировать энергопотребление непосредственно на двигателях. На рис. 16 показана схема подключения измерительных средств к экспериментальному ММР, а на рис. 17 — внешний вид подключаемого оборудования.

Измерение частоты вращения электродвигателей проводилось с помощью программатора контроллеров семейства 56F800E, который исполь-

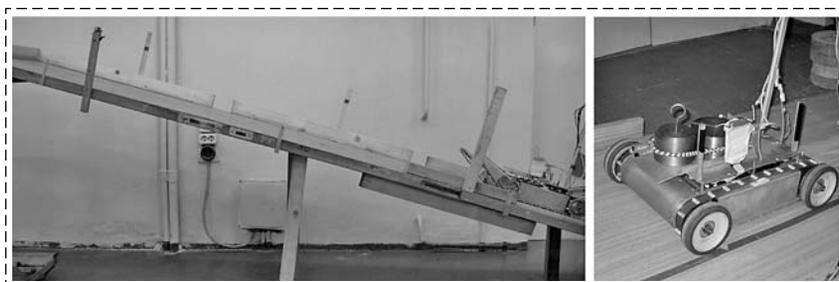


Рис. 15. Испытательный стенд и способы создания нагрузки на транспортную систему:

слева — изменение угла наклона поверхности движения; справа — изменение веса ММР с помощью грузов

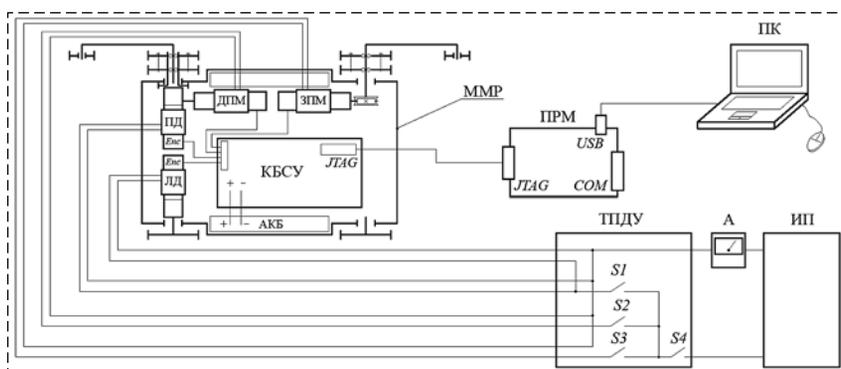


Рис. 16. Схема подключения оборудования к экспериментальному ММР:

А — амперметр; АКБ — аккумуляторная батарея; ИП — источник питания; ЛД — левый двигатель ТП; ПД — правый двигатель ТП; ДЗМ — двигатель переднего привода МИГ; ДЗП — двигатель заднего привода МИГ; КБСУ — плата контроллера бортовой системы управления ММР; ПК — персональный компьютер; ПРМ — программатор; ТПДУ — технологический пульт дистанционного управления; Элс — энкодеры двигателей; JTAG — интерфейс стандарта IEEE 1149; S1...S4 — переключатели режимов работы ТПДУ

зовался для считывания показаний непосредственно с энкодеров двигателей через имеющийся на плате контроллера БСУ интерфейс JTAG. Программатор закреплялся на корпусе ММР и через USB-интерфейс подключался к компьютеру.

Измерение действительной скорости движения мини-робота  $V_x$  осуществлялось за счет измерения времени между последовательными прерываниями двумя штангами, установленными на роботе спереди и сзади, оптических лучей от трех лазерных указок, установленных вдоль беговой дорожки на определенных расстояниях друг от друга.

Таким образом, в ходе экспериментов напрямую измерялись:

- суммарное потребление электродвигателей  $I_{\Sigma}$ ;
- частоты вращения электродвигателей  $n_{дi}$ ;
- действительная линейная скорость движения  $V_x$ .

Косвенно определялись: теоретическая скорость движения робота  $V_{теор}$ , энергозатраты на движение в каждом из звеньев транспортной системы.

На рис. 18 показаны результаты измерений суммарного потребления в приводах  $I_{\Sigma}$  при различных режимах нагружения транспортной системы: маркерами обозначены экспериментальные точки, а пунктирными линиями — результаты их аппроксимации. Достоверность аппроксимации оценивается в виде [27]

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{\sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2 / n}, \quad (18)$$

где  $R^2$  — коэффициент достоверности аппроксимации, который может принимать значения от нуля до единицы и показывает степень приближения экспериментальной зависимости к аппроксимирующей функции;  $Y_i$  — эксперимен-

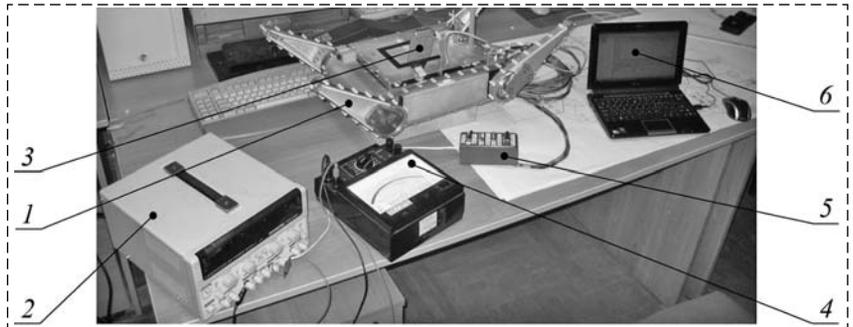


Рис. 17. Подключение измерительного оборудования к экспериментальному ММР: 1 — ММР; 2 — источник питания; 3 — программатор; 4 — амперметр; 5 — ТПДУ; 6 — компьютер

тальные значения;  $i$  — порядковый номер точки ( $i = 1, \dots, n$ );  $y_i$  — значения аппроксимирующей функции, соответствующие  $Y_i$ ;  $n$  — число точек.

Как видно из рис. 18, полученные экспериментальные зависимости хорошо аппроксимируются линейными функциями, что подтверждается приведенными на рисунке соответствующими значениями  $R^2$ .

Из рис. 18 хорошо видно различие нагрузок на приводах при движении на одинаковых углах наклона  $\alpha$ , с одинаковым грузом  $M_r$ , но при различных скоростных характеристиках, т.е. при различных напряжениях  $U_e$  (в данном примере — это линии 1 и 2 при 15 В и 33 В соответственно).

Обращает на себя внимание несколько различный характер приведенных зависимостей для гусеничной и колесной конфигураций мини-робота. Хорошо видно, что в конфигурации 4К2Г увеличение массы груза  $M_r$  не приводит к заметному повышению энергопотребления при движении по горизонтальной поверхности (точки при  $\alpha = 0^\circ$ ). Заметный в сравнении с этим рост энергопотребления в конфигурации 6Г2А говорит о более возрастающей роли внутренних потерь для этой конфигурации по мере роста общей массы робота.

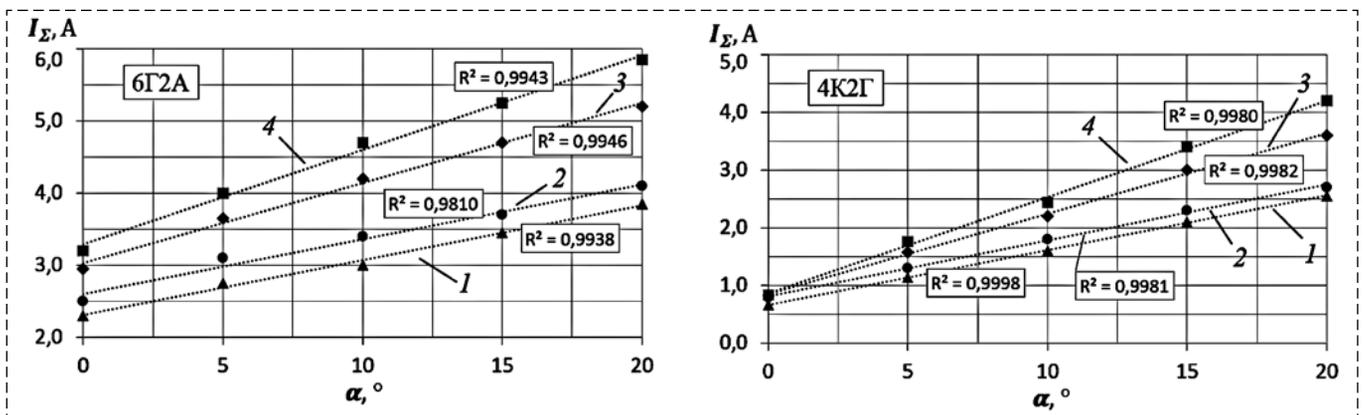


Рис. 18. Зависимости суммарного энергопотребления от режима нагружения транспортной системы ММР при прямолинейном равномерном движении:

1 —  $M_r = 0$  кг,  $U_e = 15$  В; 2 —  $M_r = 0$  кг,  $U_e = 33$  В; 3 —  $M_r = 5$  кг,  $U_e = 33$  В; 4 —  $M_r = 8$  кг,  $U_e = 33$  В

## Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Идентичность методик виртуальных (компьютерных) и физических экспериментов позволила провести сравнение полученных результатов. В ходе такого сравнения проводилась оценка расхождений расчетных и экспериментальных данных для тех параметров, которые определялись напрямую ( $I_{\Sigma}$ ,  $n_d$ ,  $V_x$ ), по формуле:

$$\delta P = \frac{P - \Theta}{P} \cdot 100, \quad (19)$$

где  $P$  — расчетное значение;  $\Theta$  — экспериментальное значение.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало близкую их сходимость в пределах расхождений  $\delta P$ , не превышающих 5...7 %, что позволяет говорить о справедливости предложенных при построении компьютерной модели подходов и адекватности самой модели транспортной системы ММР, имеющей достаточно точное соответствие своему физическому прототипу.

## Заключение

В работе проведено исследование малогабаритных транспортных систем ММР — роботов носимого типа, линейные размеры которых измеряются несколькими десятками сантиметров, а масса не превышает 15 кг. Показывается, что небольшие размеры всех элементов рассматриваемых транспортных систем влияют на методы их проектирования, требуя как особых подходов к их структурному построению, так и создания уточненных компьютерных моделей, позволяющих адекватно описывать динамику движения транспортной системы с достаточной для проектных задач точностью.

Разработаны математические и компьютерные модели всех звеньев транспортной системы ММР с реконфигурируемым шасси, проведена их экспериментальная апробация и построена модель транспортной системы, включающая две подсистемы: подсистему передвижения и подсистему изменения геометрической конфигурации шасси.

Проведено компьютерное исследование частного случая прямолинейного движения транспортной системы ММР по поверхностям с различными углами наклона. Проведены аналогичные по методическому подходу экспериментальные исследования транспортной системы макетного образца ММР и сравнение результатов компьютерных и физических экспериментов для большого числа расчетных режимов (более 20). Определены расхождения расчетных и экспериментальных данных, которые не превысили 5...7 %, что позволяет говорить о корректности предложенных в работе подходов и адекватности разработанных моделей.

Дополнительно выполненная в работе оценка показывает, что пренебрежение выявленными особенностями исследуемых малогабаритных транспортных систем ММР приводит к существенным расчетным ошибкам (15...30 %), в отличие от случая более крупных роботов, для которых такое упрощение допустимо [19, 24].

Можно отметить, что разработанные модели и подходы к их построению могут быть использованы как на проектных стадиях проектирования мобильных роботов, так и при проведении проверочных расчетов и моделирования функционирования робототехнических систем на предельных режимах эксплуатации или в критических ситуациях, являясь своего рода "цифровым двойником" физического объекта.

Полученные компьютерные модели могут быть использованы для моделирования общих случаев движения транспортной системы и в перспективе могут быть дополнены моделью системы управления ММР, что позволит отработать алгоритмы управления малогабаритным МР при его передвижении в среде с макропрепятствиями, в том числе алгоритмы автоматического преодоления этих препятствий по информации от датчиков обратных связей.

## Список литературы

1. **Васильев А. В.** Обобщенная классификация мобильных роботов // Экстремальная робототехника: Труды Международной научно-технической конференции. СПб.: Политехника-сервис, 2014. С. 41—46.
2. **Васильев А. В., Лопота А. В.** Уточнение типоразмерных групп наземных дистанционно управляемых машин для применения в опасных для человека условиях // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 1 (214). С. 226—234.
3. **Батанов А. Ф., Грицынин С. П., Муркин С. В.** Робототехнические комплексы для обеспечения специальных операций // Специальная техника. 1999. № 6. С. 10—17.
4. **Юревич Е. И.** Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 368 с.
5. **Васильев А. В.** Мобильные мини-роботы разведки: текущее состояние, характерные черты и общие тенденции развития // Избранные труды Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" (2005—2014 гг.). Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. Т. II. С. 38—42.
6. **Васильев А. В.** Реконфигурируемая транспортная платформа для малогабаритных мобильных роботов // Робототехника и техническая кибернетика. 2014. № 2 (3). С. 67—71.
7. **Рубцов И. В.** Вопросы состояния и перспективы развития отечественной наземной робототехники военного и специального назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2013. № 3 (140). С. 14—21.
8. **Лохин В. М., Манько С. В., Хованов Д. Г.** Разработка требований к робототехническим комплексам военного назначения, применяемым при ведении боевых действий в городских условиях // Перспективные системы и задачи управления: Матер. Седьмой всеросс. науч.-практ. конф. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. С. 6—11.
9. **Шерemet И. Б., Рудянов Н. А., Рябов А. В., Хрущев В. С., Комченков В. И.** Обоснование семейства боевых и обеспечивающих роботов для боя в городе // Известия ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. № 3 (128). С. 37—41.
10. **Кудряшов В. Б., Лапшов В. С., Носков В. П., Рубцов И. В.** Проблемы роботизации ВВТ в части наземной составляющей

// Известия ЮФУ. Технические науки. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2014. № 3 (152). С. 42—57.

11. **Машков К. Ю., Наумов В. Н., Рубцов И. В.** Боевые мини-роботы и обеспечение их подвижности на поле боя // Перспективные системы и задачи управления: Матер. Третьей всеросс. науч.-практ. конф. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. Т. 1. С. 145—147.

12. **Васильев А. В.** Принципы построения и классификация шасси мобильных роботов наземного применения и планетоходов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 1 (164). С. 124—131.

13. **Васильев А. В.** Исследование и классификация структурно-кинематических схем шасси мобильных роботов // Перспективные системы и задачи управления: Матер. Девятой Всеросс. науч.-практ. конф. Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2014. С. 115—128.

14. **Васильев А. В.** Методика синтеза структурно-кинематических схем шасси малогабаритных мобильных роботов // Перспективные системы и задачи управления: Матер. Десятой Всеросс. науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. Т. II. С. 146—157.

15. **Маслов О., Пузанов А., Куванов К., Платов О.** Проектирование и изготовление высокопроходимых мобильных роботов специального назначения с использованием современных САПР // Рациональное управление предприятием. 2007. № 1. С. 28—31.

16. **Космачев П. В.** Анализ конструктивных схем движителей транспортных средств робототехнических комплексов для выполнения антитеррористических операций // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. девятой Всеросс. науч.-практ. конф. СПб.: НПО Спец. материалов, 2006. Т. 5: Экстремальная робототехника. С. 607—615.

17. **Sellers D. P., Ramsbotham A. J., Bertrand H., Karvoniides N.** International Assessment of Unmanned Ground Vehicles // Institute for defense analyses // DTIC.MIL: Defense Technical

Information Center. USA, 2008. 76 p. URL: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a534965.pdf> (дата обращения: 20.12.2017).

18. **Response Robots: DHS/NIST Sponsored Evaluation Exercises (Pocket Guide, Version 2010.2) / NIST // NIST.GOV:** сайт National Institute of Standards and Technology. 231 p. USA, 2010. URL: [http://www.nist.gov/el/isd/ms/upload/2010\\_RobotGuide.pdf](http://www.nist.gov/el/isd/ms/upload/2010_RobotGuide.pdf) (дата обращения: 20.12.2017).

19. **Авотин Е. В., Болховитинов И. С., Кемурджиан А. Л., Маленков М. И., Шпак Ф. П.** / Под ред. Б. Н. Петрова, А. Л. Кемурджиана. Динамика планетохода. М.: Наука, 1979. 440 с.

20. **Седов А. Ю., Прямыцын И. Б., Коротков А. Л.** и др. Конструктивные особенности размещения приводов гусеничных платформ с изменяемой геометрией шасси // Экстремальная робототехника: Тр. Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: ООО "АП4Принт", 2016. С. 393—395.

21. **Градовцев А. А.** Методика построения полной компьютерной динамической модели робототехнической системы // Актуальные проблемы защиты и безопасности: Тр. 7-й Всеросс. науч.-практ. конф. СПб.: НПО Специальных материалов, 2004. Т. 4: Экстремальная робототехника. С. 121—126.

22. **Motor data and operating ranges of Maxon DC motors:** Maxon academy / Maxon Motor AG. 2010. URL: [https://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/8798985748510.pdf](https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8798985748510.pdf) (дата обращения 20.12.2017).

23. **Платонов В. Ф., Ленашвили Г. Р.** Гусеничные и колесные транспортно-тяговые машины. М.: Машиностроение, 1986. 296 с.

24. **Маслов О. А.** Система передвижения колесного мобильного робота сверхлегкого класса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Ковров: Ковровская гос. техн. академия, 2006. 24 с.

25. **Передвижная лаборатория на Луне Луноход-1 /** Под ред. В. Л. Барсукова. М.: Наука, 1978. Т. 2. 184 с.

26. **Гоберман Л. А.** Прикладная механика колесных машин. М.: Машиностроение, 1974. 308 с.

## Development of Computer Dynamic Model and the Study of Motion of Small Mobile Robot Transport System

**A. V. Vasiliev**, andrey@rtc.ru, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint Petersburg, 194064, Russian Federation

*Corresponding author:* **Vasiliev Andrew V.**, Leading Designer of Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: andrey@rtc.ru

*Accepted on December 26, 2017*

*The article investigates the features of mobile mini-robots (MMR) — man-portable small-sized robots, whose general dimensions are measured by several tens of centimeters, and the weight does not exceed 15 kg. When creating such robots, the main task is to ensure their functioning in indeterminate environment characterized by obstacles commensurate with or exceeding the robot's own dimensions. A study of the theory and practice of the creation of wheeled and tracked vehicles and mobile robots for various purposes shows that the existing methods of calculation and the approaches used to create them can not be just formally transferred to small-sized MMR transport systems that have a number of features that distinguish them from larger analogues. The paper investigates and substantiates the features of MMR's transport systems in terms of approaches to the design methods and mathematical description. Among such features are: small size of all elements of the driving and locomotion components, causing differences in the nature of interaction with the supporting surface; features related to the need for locomotion in an environment with macro-obstacles; the need for more accurately account for internal losses in the elements of the transport system, which begin to play an essential role relative to useful forces. The results of structural synthesis of the MMR transport system with a reconfigurable chassis are presented. The mathematical and computer models of the transport system is being constructed in two configurations: tracked and wheeled. The complete computer model of the transport system includes a mathematical description of such units as: power source, electric motors and reduction gears of traction drives and drives of chassis geometry reconfiguration mechanisms, chassis in tracked or wheel configuration. The study of the model of the transport system is considered in interaction with the surface with the specified characteristics and geometric configuration. The results of experimental studies of the linear motion of the MMR's transport system on inclined surfaces under different load conditions are presented. The obtained experimental and calculated data are compared. The revealed features of the MMR transport systems and the methods of constructing computer models taking into account these features made it possible to increase the accuracy and adequacy of the MMR motion simulation in comparison with the known approaches used in the case of larger systems.*

**Keywords:** mobile robot; mobile mini-robot; transport system; reconfiguration; chassis; computer model; simulation, experimental tests

For citation:

**Vasiliev A. V.** Development of Computer Dynamic Model and the Study of Motion of Small Mobile Robot Transport System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol. 19, no. 5, pp. 312–326.

DOI: 10.17587/mau.19.312-326

### References

1. **Vasiliev A. V.** *Obobshhonnaja klassifikacija mobil'nyh robotov* (Generalized classification of mobile robots), *Ekstremalnaya robototekhnika: Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferencii*, SPb., Politehnika-servis, 2014, pp. 41–46 (in Russian).
2. **Vasiliev A. V., Lopota A. V.** *Utochnenie tiporazmernyh grupp nazemnyh distancionno upravljajemyh mashin dlja primenenija v opasnyh dlja cheloveka uslo-vijah* (Mass-dimensional groups elaboration of ground remotely operated vehicles for hazardous environments), *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2015, no. 1 (214), pp. 226–234 (in Russian).
3. **Batanov A. F., Gricynin S. P., Murkin S. V.** *Robototekhnicheskie komplekсы dlja obespechenija special'nyh operacij* (Robotic complexes for special operations), *Special'naja Tehnika*, 1999, no. 6, pp. 10–17 (in Russian).
4. **Jurevich E. I.** *Osnovy robototekhniki* (Basics of Robotics), SPb., BHV-Peterburg, 2010, 368 p. (in Russian).
5. **Vasiliev A. V.** *Mobil'nye mini-roboty razvedki: tekushhee sostojanie, harakternye cherty i obshhie tendencii razvitiija* (Mobile reconnaissance mini-robots: current status, characteristics and general development trends), *Izbrannye tr. Vseross. nauch.-prakt. konf. "Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija"* (2005–2014), Rostov-na-Donu, Publishing house of JuFU, 2015, iss. II, pp. 38–42 (in Russian).
6. **Vasiliev A. V.** *Rekonfiguriruemaja transportnaja platforma dlja malogabaritnyh mobil'nyh robotov* (Reconfigurable transport platform for small-scale mobile robots), *Robototekhnika i Tehnicheskaja Kibernetika*, 2014, no. 2 (3), pp. 67–71 (in Russian).
7. **Rubcov I. V.** *Voprosy sostojanija i perspektivy razvitiija otechestvennoj nazemnoj robototekhniki voennogo i special'nogo naznachenija* (Issues of the state and prospects for the development of domestic ground-based robotics for military and special purposes), *Izvestija YuFU. Tehniceskie Nauki*, Taganrog, Publishing house of TTI YuFU, 2013, no. 3 (140), pp. 14–21 (in Russian).
8. **Lohin V. M., Man'ko S. V., Hovanov D. G.** *Razrabotka trebovanij k robototekhnice-skim kompleksam voennogo naznachenija, primenjaemym pri vedenii boevyh dejstvij v gorodskih uslovijah* (Development of requirements for robotic military complexes used in combat operations in urban areas), *Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija: Mat. Sed'moj vsross. nauch.-prakt. konf.*, Taganrog, Publishing house of TTI YuFU, 2012, pp. 6–11 (in Russian).
9. **Sheremet I. B., Rudianov N. A., Rjabov A. V., Hrushhev V. S., Komchenkov V. I.** *Obosnovanie semejstva boevyh i obespechivajushhijh robotov dlja boja v gorode* (The justification of the family of combat and providing robots for combat in the city), *Izvestija YuFU. Tehniceskie Nauki*, Taganrog, Publishing house of TTI YuFU, 2012, no. 3 (128), pp. 37–41 (in Russian).
10. **Kudrjashov V. B., Lapshov V. S., Noskov V. P., Rubcov I. V.** *Problemy robotizacii VVT v chasti nazemnoj sostavljajushhej* (Problems of robotization of weapons and military equipment in the part of the ground component), *Izvestija YuFU. Tehniceskie Nauki*, Taganrog, Publishing house of TTI YuFU, 2014, no. 3 (152), pp. 42–57 (in Russian).
11. **Mashkov K. Ju., Naumov V. N., Rubcov I. V.** *Boevye mini-roboty i obespechenie ih podvizhnosti na pole boja* (Combat mini-robots and ensuring their mobility on the battlefield), *Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija: Mat. Tret'ej vsross. nauch.-prakt. konf.*, Taganrog, Publishing house of TTI JuFU, 2008, vol. 1, pp. 145–147 (in Russian).
12. **Vasiliev A. V.** *Principy postroenija i klassifikacija shassi mo-bil'nyh robo-tov nazemnogo primenenija i planetohodov* (Development and classification principles of ground mobile robot's and

planet rover's chassis), *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2013, no. 1 (164), pp. 124–131 (in Russian).

13. **Vasiliev A. V.** *Issledovanie i klassifikacija strukturno-kinematicheskijh shem shassi mobil'nyh robotov* (Research and classification of structural-kinematic schemes of the mobile robot's chassis), *Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija: Mat. Devjatoj vsross. nauch.-prakt. konf.*, Taganrog, Publishing house of YuFU, 2014, pp. 115–128 (in Russian).

14. **Vasiliev A. V.** *Metodika sinteza strukturno-kinematicheskijh shem shassi malo-gabaritnyh mobil'nyh robotov* (The method of synthesis of structural-kinematic schemes of the small-sized mobile robot's chassis), *Perspektivnye sistemy i zadachi upravlenija: Mat. Desjatoj vsross. nauch.-prakt. konf.*, Rostov-na-Donu: Publishing house of YuFU, 2015, iss. II, pp. 146–157 (in Russian).

15. **Maslov O., Puzanov A., Kuvanov K., Platov O.** *Proektirovanie i izgotovlenie vysokoprodimijh mobil'nyh robotov speci-al'nogo naznachenija s ispol'zovaniem sovremennyh SAPR* (Designing and manufacturing of highly high-mobility mobile robots of special purpose using modern CAD), *Racional'noe upravlenie predprijatijem*, 2007, no. 1, pp. 28–31 (in Russian).

16. **Kosmachjov P. V.** *Analiz konstruktivnyh shem dvizhitelej transportnyh sredstv robototekhnicheskijh kompleksov dlja vypolnenija antierroristicheskijh operacij* (The analysis of constructive schemes of vehicles of robot-technical complexes for carrying out antiterrorist operations), *Aktual'nye problemy zashhity i bezopasnosti: Tr. devjatoj Vseross. nauch.-prakt. konf.*, SPb., NPO Spec. materialov, 2006, vol. 5: *Jekstremalnaja Robototekhnika*, pp. 607–615 (in Russian).

17. **Sellers D. P., Ramsbotham A. J., Bertrand H., Karvonides N.** *International Assessment of Unmanned Ground Vehicles*, Institute for defense analyses, DTIC.MIL: Defense Technical Information Center, USA, 2008, 76 p., available at: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a534965.pdf> (accessed: 20.12.2017).

18. **Response Robots: DHS/NIST Sponsored Evaluation Exercises** (Pocket Guide, Version 2010.2), NIST // NIST.GOV: National Institute of Standards and Technology site, 231 p., USA, 2010, available at: [http://www.nist.gov/el/isd/ms/upload/2010\\_RobotGuide.pdf](http://www.nist.gov/el/isd/ms/upload/2010_RobotGuide.pdf) (accessed: 20.12.2017).

19. **Avotin E. V., Bolhovitinov I. S., Kemurdzhian A. L., Malenkov M. I., Shpak F. P.** Ed. by Petrov B. N., Kemurdzhian A. L. *Dinamika planetohoda* (The planet rovers dynamics), Moscow, Nauka, 1979, 440 p. (in Russian).

20. **Sedov A. Ju., Prjamicyan I. B., Korotkov A. L.** et al. *Konstruktivnye osobennosti razmeshhenija privodov gusenichnyh platform s iz-menjaemoj geometrijej shassi* (Design features of the placement of drives for crawler platforms with the chassis variable geometry), *Ekstremalnaya robototekhnika: Tr. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf.*, SPb., OOO "AP4Print", 2016, pp. 393–395 (in Russian).

21. **Gradovcev A. A.** *Metodika postroenija polnoj komp'juternoj dinamicheskoj modeli robototekhnicheskijh sistemy* (The method of constructing a complete computer dynamic model of a robotic system), *Aktual'nye problemy zashhity i bezopasnosti: Tr. sed'moj Vseross. nauch.-prakt. konf.*, SPb., NPO Special'nyh materialov, 2004, iss. 4: *Ekstremalnaya Robototekhnika*, pp. 121–126 (in Russian).

22. **Motor** data and operating ranges of Maxon DC motors: Maxon academy / Maxon Motor AG, 2010, available at [https://www.maxonmotor.com/medias/sys\\_master/8798985748510.pdf](https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/8798985748510.pdf) (дата обращения 20.12.2017).

23. **Platonov V. F., Leishvili G. R.** *Gusenichnye i koljosnye transportno-tjagovye mashiny* (Crawler and wheeled transport-traction machines), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 296 p. (in Russian).

24. **Maslov O. A.** *Sistema peredvizhenija koljosnogo mobil'nogo robota sverhlgjokogo klassa* (The system of movement of a mobile mobile robot of an ultralight class): Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.02, Kovrov, Kovrovskaja gos. tehn. akademija, 2006, 24 p. (in Russian).

25. **Barsukov V. L.** *Peredvizhnaja laboratorija na Lune Lunohod-1* (Mobile laboratory on the Moon Lunokhod-1), Moscow, Nauka, 1978, vol. 2, 184 p. (in Russian).

26. **Goberman L. A.** *Prikladnaja mehanika koljosnyh mashin* (Applied Mechanics of Wheeled Vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 1974, 308 p. (in Russian).