

О. А. Тягунов, д-р техн. наук, проф., tyagunov@mirea.ru, **М. А. Теплов**, аспирант, maxim.teplov@gmail.com, Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники (МИРЭА)

Об одной задаче формирования программных законов управления исполнительным уровнем автономных тяжелых МРТК

Рассматривается задача разработки программных законов управления исполнительного уровня автономных тяжелых мобильных робототехнических комплексов (МРТК). Использование методов ситуационного управления и формализации экспертных знаний позволило построить программные законы управления исполнительного уровня в форме согласованных между собой временных диаграмм изменения положения исполнительных органов МРТК в условиях неопределенности.

Ключевые слова: мобильный робот, режимы автономного управления, ситуационное управление, исполнительный уровень, факторы неопределенности, экспертные системы

Тяжелые мобильные машины гусеничного исполнения (ТГМ) являются важным классом подвижных наземных средств, предназначенных для решения различных задач. В начале 80...90-х годов XX века возникла проблема роботизации основных типов ТГМ. По мнению многих специалистов, создание на основе ТГМ тяжелых мобильных робототехнических комплексов (МРТК) позволит существенно повысить эффективность использования ТГМ различного назначения.

Следует заметить, что в большинстве зарубежных и отечественных разработок МРТК, как правило, используется дистанционный принцип управления, при котором перемещение в пространстве и реализация функциональных возможностей МРТК осуществляется с командного пункта специально обученными операторами по каналам связи (кабельным или беспроводным). К основному достоинству дистанционного принципа управления МРТК можно отнести сравнительно простую его реализацию при надежных каналах связи и высокой квалификации операторов. Из недостатков дистанционного управления можно отметить:

- а) ограниченность радиуса действия МРТК;
- б) необходимость непрерывного участия операторов в процессе управления как МРТК в целом, так и его отдельными подсистемами;
- в) возможность использования для решения сравнительно несложных задач роботизации.

Поэтому в последнее время значительный интерес во всем мире проявляется к использованию в МРТК режима автономного управления, при котором определенная часть функций, выполняемых оператором командного пункта, может передаваться бортовой системе управления.

При этом в МРТК наряду с режимами дистанционного управления могут появляться режимы управления (этапы автономного управления), реализуемые средствами исключительно бортовой системы управления без непосредственного участия оператора командного пункта. Задаче построения основных законов управления исполнительным уровнем малых и средних автономных МРТК по-

священо достаточно много работ, из которых можно отметить работы [1—6]. Однако полученные результаты практически неприменимы при построении законов управления исполнительным уровнем тяжелых автономных МРТК. В значительной мере это связано с тем, что для процесса движения этого класса МРТК характерно наличие факторов неопределенности (неточное знание моделей динамики МРТК, сложный характер взаимодействия движителя МРТК и поверхности перемещения и т. д.).

Следует заметить, что в работах авторов [7, 8] были рассмотрены постановки и получены решения задач определения структуры и параметров законов управления стабилизации скорости и курса тяжелых МРТК в режиме автономного управления, причем были использованы процедуры построения множества точек Парето в сечениях критериального пространства с последующим выбором компромиссных точек (процедуры многокритериального выбора параметров).

Данная статья посвящена задаче построения программных законов управления исполнительного уровня МРТК в режиме автономного перемещения в условиях действия факторов неопределенности.

1. Тяжелый МРТК как объект управления

МРТК как объект управления имеет ряд особенностей. Во-первых, МРТК — это сложная механическая система, состоящая из большого числа механически связанных подсистем (корпуса, двигателя, трансмиссии, подвески и т. д.) Во-вторых, движение МРТК часто происходит в условиях сложной, часто пересеченной местности, изобилующей различными препятствиями, подъемами и спусками, косогорами и оврагами. В-третьих, при движении МРТК возникают такие эффекты, как буксование и юз, связанные с деформацией грунта [9—11]. Как следствие, полные уравнения управляемого движения МРТК, описывающие динамику его движения в трехмерном пространстве с учетом сложного взаимодействия движителя МРТК с поверхностью перемещения, в условиях присутствия факторов

неопределенности получить в явном виде практически невозможно. Тем не менее, возможно построение упрощенных моделей динамики МРТК [13], удобных для создания алгоритмов управления отдельными режимами движения.

Основные органы управления МРТК

Несмотря на значительное разнообразие вариантов конструктивного исполнения, можно выделить следующие основные органы управления, используемые для управления движением МРТК:

- 1) педаль сцепления — для подключения/отключения двигателя от трансмиссии;
- 2) избиратель передачи — для изменения номера передачи;
- 3) рычаги поворотов — для выполнения поворотов МРТК;
- 4) тормоза — для торможения МРТК;
- 5) рейка топливного насоса — для регулирования скорости движения.

Сенсорные датчики, необходимые для управления исполнительным уровнем движения МРТК

Перечислим датчики, которые необходимы для отработки алгоритмов автономного перемещения: датчик пути, датчик скорости, датчик углового ускорения, датчик положения МРТК в пространстве, датчики дифферента и крена.

Особенности управления движением МРТК при использовании автономного режима

Система исполнительного уровня МРТК на автономном участке движения должна обеспечивать автоматическое выполнение базового набора команд (трогание, разгон, торможение, остановку, удержание (стабилизацию) заданных значений скорости, курса и, возможно, радиуса поворота) и отработку заданных траекторий движения (последовательностей из базового набора команд). Базовые команды — это фактически "кирпичики", из которых формируется заданная программа формирования траектории движения. В принципе, перечень заданных траекторий движения может быть достаточно большим. Приведем некоторые наиболее типичные варианты:

1. Трогание + разгон + выход на заданную скорость прямолинейного движения и ее стабилизация + переход на следующую скорость движения + далее несколько этапов изменения скорости + торможение (остановка).

2. Трогание + разгон + выход на заданную скорость прямолинейного движения и ее стабилизация + поворот на заданный угол и его стабилизация при заданной скорости + выход на заданную скорость прямолинейного движения и ее стабилизация + поворот на новый угол с последующим прямолинейным движением + торможение (остановка).

При реализации автономного режима каждой базовой команде соответствует свой вариант сово-

купности согласованных действий (управляющих воздействий) на органы управления, зависящий как от текущего состояния МРТК, так и от типа и состояния грунта, по которому происходит перемещение МРТК. В частности, при реализации команды "трогание" используются различные управления в случаях трогания на подъеме, на спуске, в горизонтальном положении, а также на сыпучих или вязких грунтах.

подавляющее число базовых команд практически реализуются как согласованные во времени программные воздействия на управляющие органы, за исключением двух команд ("стабилизация скорости" и "стабилизация курса"), при реализации которых используется принцип управления с обратной связью (задачи формирования этих команд рассмотрены в работах [7, 8]).

2. Разработка структуры основных законов управления программными режимами движения МРТК на основе использования ситуационного управления и формализации экспертных знаний

При разработке законов управления основными программными режимами движения МРТК будем использовать метод ситуационного управления [13] (при этом отпадает необходимость в использовании математических моделей управляемого движения МРТК) и экспертные данные о допустимых законах программного управления МРТК, базирующиеся на широко используемых на практике методиках обучения механиков-водителей ТГМ.

Мы выделяем три этапа решения этой задачи.

1. Этап формирования вербальной версии законов программного управления для базовых команд в различных ситуациях.

После знакомства с особенностями построения аппаратных средств ТГМ и принципов работы основных исполнительных органов обучаемый (механик-водитель) приступает к изучению основных правил управления исполнительными органами с последующим приобретением практических навыков работы на соответствующих тренажерах и на самой ТГМ. Основные правила управления исполнительными органами ТГМ, как известно, состоят в реализации согласованных между собой временных диаграмм изменения положения исполнительных органов для каждого режима движения в различных условиях (тип и состояние грунта, начальное положение (покой или движение), профиль движения и т. д.). Правила управления движением рассматриваются в наставлениях и учебных пособиях [14]. Рассмотрим в соответствии с работой [14] правила управления для реализации режима трогания (начала движения) ТГМ в различных условиях. Например, если трогание ТГМ происходит на горизонтальном участке, то правила имеют следующий вид: "Для трогания ТГМ с места на ровном участке нужно отпустить педаль тормоза, выжать педаль главного фрикциона, выждать 2...3 с и вклю-

чить выбранную передачу и далее отпустить педаль главного фрикциона, одновременно по мере нарастания нагрузки увеличивая подачу топлива". В частности, в случае "тяжелого" грунта выбирается замедленная передача, а в случае более "легких" — более скоростные передачи.

Если же движение ТГМ начинается на *подъеме*, то модифицированная версия правила имеет вид: "Для трогания с места ТГМ на подъеме нужно, нажав на педаль тормоза, снять ее с защелки, но не отпускать, затем выжать педаль главного фрикциона, включить низшую передачу, отпустить педаль тормоза и, отпустив педаль главного фрикциона, включить его и, одновременно увеличивая подачу топлива, дождаться начала движения ТГМ, не допуская скатывания ее назад".

Для трогания ТГМ на *спуске* справедлива следующая версия правила: "Для трогания ТГМ с места на спуске нужно, нажав на педаль тормоза, снять ее с защелки, но не отпускать, затем выжать педаль главного фрикциона, включить передачу и, отпустив педаль главного фрикциона, включить его, одновременно растормаживая ТГМ, т. е. отпуская педаль тормоза. При этом движение педали главного фрикциона должно несколько опережать движение педали тормоза".

Представленные вербальные версии правил согласованного управления исполнительными органами МРТК для режима трогания МРТК соответствуют вариантам ситуации, характеризующей профиль движения "горизонтальное движение", "подъем" и "спуск" без учета других факторов неопределенности. Для других вариантов ситуаций (*типы грунтов* (твердые, связные, сыпучие), *климатические условия* (сухой или влажный грунт)) описанные выше правила управления исполнительными органами в соответствии с опытом водителей-механиков и наставлениями могут быть модифицированы.

Заметим, что и для всех остальных программных режимов движения (переключение коробки передачи, поворот на заданный угол и т. д.) могут (и должны) быть составлены вербальные версии правил согласованного управления исполнительными органами МРТК, которые, по сути, являются совокупностью экспертных знаний и могут быть использованы при построении системы управления исполнительным уровнем МРТК.

2. *Этап формирования по данным пункта 1 графических версий совокупности временных диаграмм изменения состояния управляющих органов МРТК с последующим построением математических моделей.*

Представленные в п. 1 экспертные знания записаны в вербальной (описательной) форме, и поэтому возникает необходимость в построении формализованных версий представленных правил управления движением МРТК.

Общие вопросы построения формализованных моделей управления в интеллектуальных системах рассматривались в различных публикациях [15, 16

и т. д.]. При построении формализованных моделей управления движением МРТК для нас будет удобно пойти по пути формирования совокупностей кусочно-гладких функций (временных диаграмм) изменения состояния каждого из управляющих органов МРТК, согласованных между собой по времени. Это позволит в дальнейшем для каждой складывающейся ситуации построить оптимальную (квазиоптимальную) совокупность согласованных во времени диаграмм изменения положения управляющих органов.

На рис. 1—3 приведены варианты временных диаграмм исполнительных органов МРТК для режима трогания для трех вариантов профиля движения ("горизонтальное движение", "подъем" и "спуск"), составленные в соответствии с описанными выше "экспертными знаниями". В частности, "для горизонтального (ровное место) профиля" (рис. 1) последовательно происходит снятие с тормоза (кривая 2, момент времени t_0) и выжимание (выключение) главного фрикциона (кривая 1, момент времени t_1) с последующим включением номера передачи (кривая 4, момент времени t_2), а затем практически одновременно происходит отпусkanie (включение) главного фрикциона (момент времени t_3) и увеличение подачи топлива ("газа", кривая 3, момент времени t_4).

Для случая трогания на "подъеме" (рис. 2) характерно выжимание (выключение) главного фрик-



Рис. 1. Программные законы изменения исполнительных органов МРТК при трогании на горизонтальном участке (1 — сцепление, 2 — тормоз, 3 — газ, 4 — номер передачи)

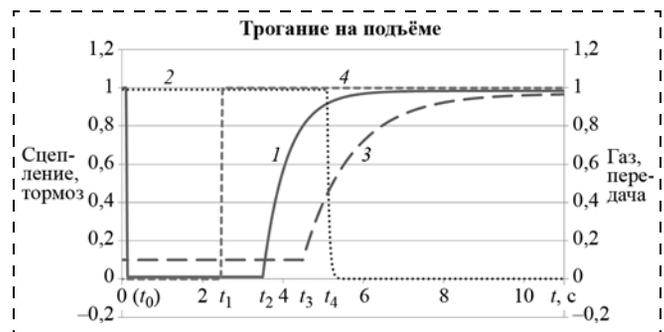


Рис. 2. Программные законы изменения исполнительных органов МРТК при трогании на подъеме (1 — сцепление, 2 — тормоз, 3 — газ, 4 — номер передачи)

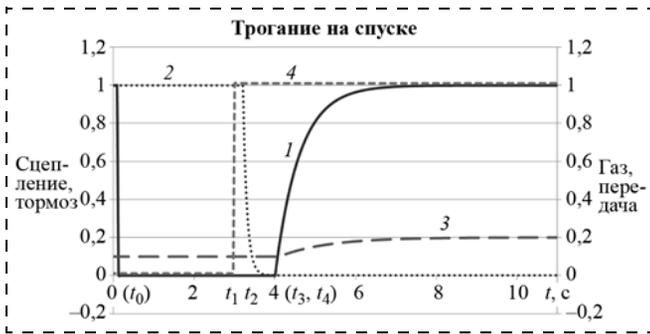


Рис. 3. Программные законы изменения исполнительных органов МРТК при трогании на спуске (1 — сцепление, 2 — тормоз, 3 — газ, 4 — номер передачи)

циона (кривая 1, момент времени t_0) с последующим включением пониженного номера передачи (кривая 4, момент времени t_1), а снятие с тормоза (кривая 2, момент времени t_2) наступает лишь после отпускания (включения) главного фрикциона (момент времени t_2) и увеличения подачи топлива ("газа", кривая 3, момент времени t_3), что обеспечивает предотвращение скатывания МРТК.

При трогании на "спуске" (рис. 3) происходит выжимание (выключение) главного фрикциона (кривая 1, момент времени t_0), далее выбирается номер передачи (кривая 4, момент времени t_1), с последующим растормаживанием (кривая 2, момент времени t_2), при этом может подаваться ограниченное количество топлива ("газа", кривая 3, момент времени t_3). Для случая крутого "спуска" для предотвращения скатывания МРТК могут включаться режимы подтормаживания.

Следует заметить, что в процессе построения кривых чрезвычайно важно не нарушать основные экспертные знания, например, снимать тормоз лишь после включения главного фрикциона и увеличения подачи "газа" при трогании на подъеме и т. д. Форма отрезков кривых определяется чисто качественно, удовлетворяя естественным ограничениям (кусочная гладкость, условия возрастания, убывания, постоянство и т. д.).

Математические модели программных законов управления исполнительного уровня МРТК, представленных в виде согласованных временных диаграмм, удобно представлять в виде совокупности кубических сплайн-функций, позволяющих добиться хорошей точности приближения отрезков временных диаграмм. Технологии построения кубических сплайн-функций разработаны достаточно хорошо [19], поэтому мы не будем останавливаться на этом.

Авторами разработаны формализованные версии "экспертных знаний" в виде согласованных временных диаграмм изменения положения исполнительных органов МРТК для всех вариантов типовых команд движения для всех складывающихся ситуаций.

3. Этап разработки структурной схемы многорежимного программатора.

Рассмотрим задачу разработки структурной схемы устройства, позволяющего формировать программные законы управления для исполнительной подсистемы МРТК, при этом воспользуемся концепцией многорежимного регулятора, предложенной в работе [20] и позволяющей определить структуру регулятора для системы управления объектом, функционирующего в условиях конечного числа динамических ситуаций. В нашем случае будем говорить об использовании многорежимного программатора, позволяющего для каждой из базовых команд и соответствующих им динамических ситуаций выбрать необходимый программный закон управления исполнительными органами, а именно, согласованную совокупность временных диаграмм изменения во времени исполнительных органов (задающие воздействия).

Как и в работе [20], динамическая ситуация, соответствующая заданной базовой команде, определяется вектором состояния объекта управления (МРТК) и физическими характеристиками грунта, по которому перемещается МРТК. Тогда по данным этапов 1 и 2 данной базовой команде в сложившейся динамической ситуации будет соответствовать совокупность согласованных временных диаграмм, которые можно использовать как задающие воздействия на исполнительные подсистемы, обеспечивающие реализацию выбранной базовой команды. Структура многорежимного программатора, реализующая предложенную схему формирования программных законов управления исполнительной подсистемы МРТК, приведена на рис. 4. В состав программатора входит цепочка из n программ, соответствующих заданной базовой команде с n возможными динамическими ситуациями, и контроллер режимов, анализирующий текущую динамическую ситуацию и включающий в зависимости от этого соответствующую этому режиму программу задающих воздействий на исполнительную подсистему.

В частности, функциональная схема многорежимного программатора, соответствующая базовой команде "трогание", приведена на рис. 5. В данном

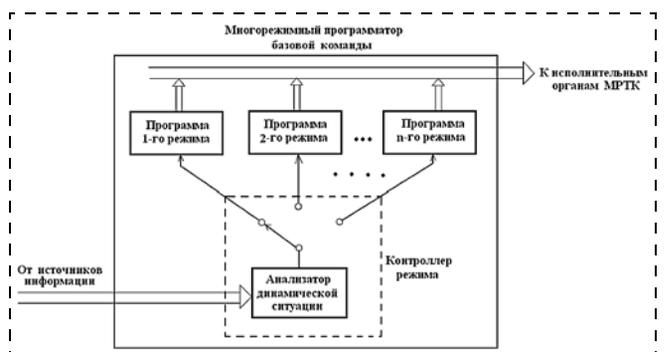


Рис. 4. Функциональная схема многорежимного программатора для базовых команд исполнительного уровня МРТК

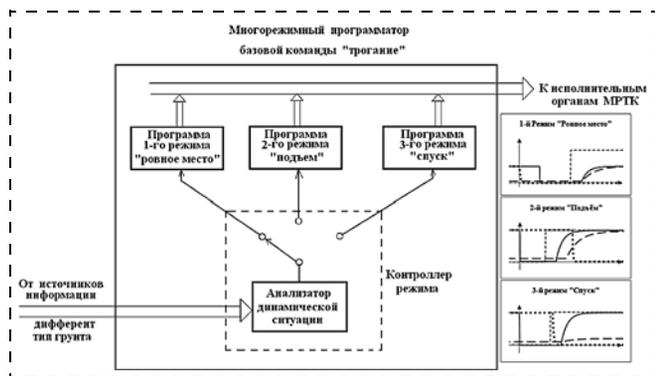


Рис. 5. Функциональная схема многорежимного программатора для базовой команды "трогание" исполнительного уровня МРТК

случае мы имеем дело с тремя динамическими ситуациями, определяемыми лишь профилем движения ("ровное место", "подъем" и "спуск") и состоянием покоя МРТК без учета физических свойств грунта и тремя соответствующими им программными законами воздействия на исполнительные органы МРТК. В качестве источника информации о сложившейся динамической ситуации используются показания от датчика дифференциала.

3. Вычислительные эксперименты для проверки предложенного подхода к формированию программных законов управления исполнительного уровня МРТК

Для проверки эффективности предложенного подхода к построению программных законов управ-

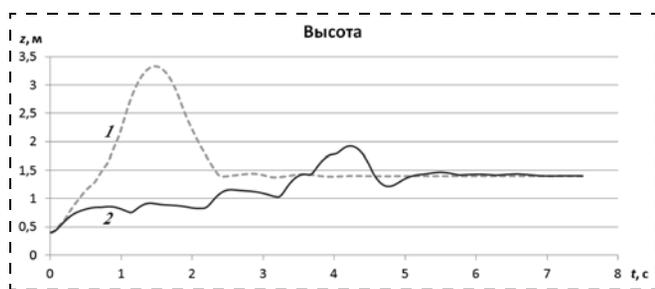


Рис. 6. Графики изменения высоты центра масс МРТК при преодолении эскарпа для двух способов управления (1 — неоптимальное преодоление эскарпа, 2 — оптимальное преодоление эскарпа)

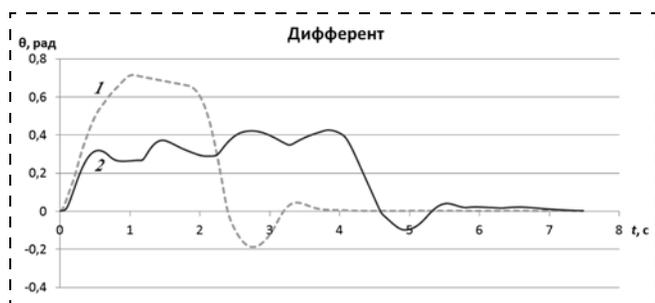


Рис. 7. Графики изменения дифференциала МРТК при преодолении эскарпа для двух способов управления (1 — неоптимальное преодоление эскарпа, 2 — оптимальное преодоление эскарпа)

ления исполнительного уровня автономных тяжелых МРТК, основанных на использовании метода ситуационного управления и интеллектуальных технологий, были выполнены многочисленные вычислительные эксперименты, основанные на использовании возможностей программных систем DynSoft ROBSIM 5 [17] и "Универсальный механизм" [18].

Для примера приведем результаты экспериментов, связанных с реализацией программных режимов движения МРТК для различных способов (допустимого и нежелательного) преодоления автономным тяжелым МРТК препятствия типа "эскарп" (вертикальная стенка).

В первом случае МРТК преодолевает (переезжает) эскарп без снижения скорости ($V = 2$ м/с). В соответствии с наставлениями по обучению механиков-водителей тяжелых МРТК [14] этот способ преодоления эскарпа нежелателен, поскольку на практике может привести к повреждению корпуса и поломке механизмов трансмиссии МРТК (неоптимальное преодоление эскарпа).

Во втором случае МРТК преодолевает эскарп в соответствии с рекомендациями наставлений, а именно, по мере приближения к эскарпу скорость МРТК снижается практически до нулевой. Далее, после касания с препятствием скорость начинает постепенно увеличиваться, и МРТК плавно преодолевает препятствие (оптимальное преодоление эскарпа).

Результаты моделирования приведены на рис. 6, 7, где представлены графики изменения высоты центра масс (рис. 6) и дифференциала (рис. 7) для двух вариантов способа преодоления эскарпа (кривая 1 — неоптимальное преодоление эскарпа, кривая 2 — оптимальное преодоление эскарпа).

Из результатов моделирования следует, что МРТК "подскакивает" при преодолении эскарпа на ненулевой скорости, что может быть опасно для механизмов трансмиссии. В целом, это подтверждает справедливость экспертных заключений о нецелесообразности использования описанного способа преодоления препятствия.

Заключение

На основе использования методов ситуационного управления и формализации экспертных знаний по управлению ТГМ были разработаны программные законы управления исполнительным уровнем МРТК в форме согласованных между собой временных диаграмм изменения положения исполнительных органов МРТК в условиях основных факторов неопределенности, влияющих на процесс его перемещения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем управления автономных МРТК нового поколения, в частности, при создании систем управления исполнительного уровня, основанных на использовании современных интеллектуальных технологий, существенно расширяющих возможности МРТК.

Следует также заметить, что представленные в работе результаты позволяют сформулировать и решить проблему оптимизации программных режимов управления МРТК в условиях неопределенности с использованием робастного принципа максимума [21].

Авторы выражает искреннюю благодарность д. т. н., проф. Лохину В. М., д. т. н., проф. Манько С. В. и д. т. н., проф. Романову М. П. за внимание и поддержку выполненных исследований.

Список литературы

1. Бурдаков С. Ф., Мирошник И. В., Стельмаков Р. Э. Системы управления движением колесных роботов. СПб.: Наука, 2001. 227 с.
2. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. Вып. 8. С. 29—80.
3. Емельянов С. Н., Платонов А. К., Ярошевский В. С. Система управления полноприводного трехколесного движителя // Мобильные роботы и мехатронные системы. М.: Изд-во МГУ, 2000. С. 89—99.
4. Ploeg J., Vissers John P. M., Nijmeijer H. Control design for an overactuated wheeled mobile robot // 4th IFAC Symposium on Mechatronics Systems. Eds. IFAC, Heidelberg, Germany, 2006. P. 127—132.
5. Brauni T. Embedded robotics: mobile robot design and applications, Springer Verlag, 2006, 210 p.
6. Calisia D., Iocchi L., Nardia D., Scalzoa C. M., Ziparoa V. A. Context-based design of robotic systems // Robotics and Autonomous Systems. 2008. Vol. 56, N. 11. P. 992—1003.

7. Тягунов О. А., Теплов М. А. Настройка типовых регуляторов для стабилизации скорости движения мобильного робототехнического комплекса с использованием технологии построения Парето-оптимальных решений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 4. С. 19—25.
8. Тягунов О. А., Теплов М. А. Парето-оптимальная настройка типовых регуляторов в системе стабилизации курса мобильного робототехнического комплекса // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 23—29.
9. Bekker M. G. Introduction to Terrain-Vehicle Systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1969. 566 p.
10. Wong J. Y. Theory of ground vehicle. N.Y.: John Wiley, 1978. 232 p.
11. Wong J. Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering. L: Elsevier, 2010. 468 p.
12. Забавников Н. А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с.
13. Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 268 с.
14. Катунский А. М. Вождение танков. М.: Воениздат, 1976. 176 с.
15. Кондрашина Е. Ю., Литвинцева Л. В., Поспелов Д. А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах. М.: Наука, Физматлит. 1989. 328 с.
16. Приобретение знаний: Пер. с япон. / Под ред. С. Осуги, Ю. Саэки. М.: Мир, 1990. 304 с.
17. URL: www.robsim.dynsoft.ru.
18. URL: www.umlab.ru.
19. Alberg J. H., Nilson E. H., Walsh J. L. The theory of splines and their applications N.Y. Lon.: Academic Press, 1967. 316 p.
20. Солодовников В. В., Филимонов Н. Б. Динамическое качество систем автоматического управления. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1987. 84 с.
21. Boltyanski V. G., Poznyak A. S. The robust maximum principle. Birkhauser, 2012. 455 p.

A Problem of the Software Implementation of the Execution Level Control Actions of a Heavy Autonomous Mobile Robot

О. А. Tyagunov, tyagunov@mirea.ru✉, **М. А. Teplov**, maxim.teplov@gmail.com,
Moscow State University of Information Technology, Radio Engineering and Electronics (MIREA),
Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: Tyagunov Oleg A., D. Sc., Professor, Moscow State University of Information Technology, Radio Engineering and Electronics (MIREA), Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: tyagunov@mirea.ru

Received on August 03, 2015

Accepted on August 24, 2015

Heavy vehicles are an important class of the multi-purpose mobile ground vehicles. According to an expert opinion, development of the heavy mobile robots (mobots) based on HTVs will boost the efficiency of different purpose HTVs. It should be underlined that most of the domestic and foreign mobot solutions are usually based on a remote control, when a specially trained expert uses a cable or wireless liaison to control a mobot's spatial motion and other functionalities from a control station. Thus, the individual control method, in which certain functions of a Control station operator can be delegated to the onboard control system, is nowadays of huge interest worldwide. For this reason, within a mobot, besides the remote control modes, the individual control modes can be implemented, which are carried out by the onboard control system only, without any direct involvement of a control station operator. That means formalization of the expert knowledge acquired by human crew members in the form of a set of time diagrams of the operating members' configuration. There are many works dedicated to development of the executive level control actions of small and medium autonomous mobots. However, the achieved results are almost inapplicable for development of the executive level controls for the heavy autonomous mobots. To a great extent this is due to the fact that there are many uncertainties concerning the movement process of the mobots of the aforesaid class. Such uncertainties include imperfect dynamics model of the mobot, complexity of interaction between the robot's running gear and the movement surface, etc. This article is dedicated to the software of the mobot execution level control actions in the standalone mode. Employment of the methods of the situation control and formalization of the expert knowledge made it possible to implement the software for the execution level control actions in the form of a set of coherent time diagrams showing variation of the operating members' configuration in the conditions of uncertainties.

Keywords: mobile robot, individual control modes, situation control, uncertainties, expert systems

For citation:

Tyagunov O. A., Teplov M. A. A Problem of the Software Implementation of the Execution Level Control Actions of a Heavy Autonomous Mobile Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 12, pp. 822–828.

DOI: 10.17587/mau/16.822-828

References

1. **Burdakov S. F., Miroshnik I. V., Stel'makov P. E.** *Sistemy upravleniya dvizheniem kolesnykh robotov* (Wheeled Robots' Motion Control System), Saint Petersburg, Nauka, 2001, 227 p. (in Russian).
2. **Martynenko Yu. G.** *Upravlenie dvizheniem mobil'nykh kolesnykh robotov* (Wheeled Mobile Robots Motion Control), Fundamental'naya i prikladnaya matematika, 2005, vol. 11, no. 8, pp. 29–80 (in Russian).
3. **Emel'yanov S. N., Platonov A. K., Yaroshevskii V. S.** *Sistema upravleniya polnoprivodnogo trekhkolesnogo dvizhitelya, Mobil'nye roboty i mekhatronnye sistemy* (All-Three-Wheel-Drive Locomotor Control System, Mobile Robots and Mechatronics Systems), Moscow, Izdatel'svo MGU, 2000, pp. 89–99 (in Russian).
4. **Ploeg J., Vissers John P. M., Nijmeijer H.** Control design for an overactuated wheeled mobile robot, *4th IFAC Symposium on Mechatronics Systems*. Eds. IFAC, Heidelberg, Germany, 2006, pp. 127–132.
5. **Braunl T.** *Embedded robotics: mobile robot design and applications*, Springer Verlag, 2006, 210 p.
6. **Calisia D., Iocchi L., Nardis D., Scalzoa C. M., Ziparoa V. A.** Context-based design of robotic systems, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, No. 11, 2008, pp. 992–1003.
7. **Tyagunov O. A., Teplov M. A.** *Nastroika tipovykh pegulyatorov dlya stabilizatsii skorosti dvizheniya mobil'nogo robototekhnicheskogo kompleksa s ispol'zovaniem tekhnologii postroeniya Paretooptimal'nykh reshenii* (Adjustment of the Typical Regulators in the Speed Stabilization System of the Mobile Robotic Complex Using Pareto-Optimization Solutions), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 4, pp. 19–25 (in Russian).
8. **Tyagunov O. A., Teplov M. A.** *Pareto-optimal'naya nas troika tipovykh pegulyatorov v sisteme stabilizatsii kursa mobil'nogo robototekhnicheskogo kompleksa* (Pareto-Optimal Adjustment of the Mobile Typical Regulators in the Azimuth Stabilization System of the Mobile Robotic Complex), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 9, pp. 23–29 (in Russian).
9. **Bekker M. G.** *Introduction to Terrain-Vehicle Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1969, 566 p.
10. **Wong J. Y.** *Theory of ground vehicle*, N.Y., John Wiley, 1978, 232 p.
11. **Wong J. Y.** *Terramechanics and off-road vehicle engineering*, Elsevier, 2010, 468 p.
12. **Zabavnikov N. A.** *Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin* (Fundamentals of Theory of Transport Tracked Vehicles), Moscow, Mashinostroenie, 1975, 448 p. (in Russian).
13. **Pospelov D. A.** *Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika* (Situational Control: Theory and Practice), Moscow, Nauka, 1986, 228 p. (in Russian).
14. **Katunskii A. M.** *Vozhdenie tankov* (Tank Driving), Moscow, Voenizdat, 1976, 176 p. (in Russian).
15. **Kondrashina E. Yu., Litvintseva L. V., Pospelov D. A.** *Predstavlenie znaniy o vremeni i prostranstve v intellektual'nykh sistemakh* (Representation of knowledge on time and space in intellectual systems), Moscow, Nauka, Fizmatlit, 1989, 328 p. (in Russian).
16. **Osugi S., Saeki Yu. ed.** *Priobretenie znaniy* (Knowledge Acquisition). Trans. from Jap. Ed. by S. Osuga, Y. Saeki), Moscow, Mir, 1990, 304 p. (in Russian).
17. Available at: www.robsim.dynsoft.ru.
18. Available at: www.umlab.ru.
19. **Alberg J. H., Nilson E. H., Walsh J. L.** *The theory of splines and their applications*, N.Y. Lon., Academic Press, 1967, 316 p.
20. **Solodovnikov V. V., Filimonov N. B.** *Dinamicheskoe kachestvo sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* (The dynamic quality of automatic control systems), Moscow, Publishing house of MGITU im. N. E. Bauman, 1987, 84 p. (in Russian).
21. **Boltyanski V. G., Poznyak A. S.** *The robust maximum principle*, Birkhauser, 2012, 455 p.

УДК 531.3

DOI: 10.17587/mau.16.828-835

А. В. Борисов, канд. техн. наук, доц., BorisowAndrej@yandex.ru,
Филиал ФГБОУ ВПО НИУ "МЭИ" в г. Смоленске

Автоматизация разработки трехмерных моделей экзоскелетов со звеньями переменной длины¹

Рассматриваются трехмерные модели экзоскелетов со звеньями переменной длины. На основании анализа уравнений для стержневых механических систем с различным числом звеньев строится обобщение уравнений движения экзоскелетов в векторно-матричном виде. Выводятся формулы для элементов каждой матрицы, входящей в уравнения. В результате становится возможным автоматизированно записывать уравнения движения для стержневых n -звенных систем типа трехмерной модели экзоскелета, минуя этап их составления, в чем и заключается новизна исследования.

Ключевые слова: уравнения движения, изменение длины звена, матрица, механическая стержневая система, экзоскелет, антропоморфный робот, протез, опорно-двигательный аппарат человека, трехмерное пространство

Введение

При исследовании сложных механических систем с большим числом степеней свободы составление дифференциальных уравнений движения представляет значительные трудности. Для стержневых систем с шарнирами, к которым относятся экзоскелеты и антропоморфные роботы, состоящих из длинных

кинематических цепей, применение уравнений Лагранжа второго рода приводит к практически экспоненциальному росту объема вычислений, необходимых для записи дифференциальных уравнений движения, в зависимости от числа звеньев [1]. Для решения подобных задач необходимо создавать методы и алгоритмы компьютерно-ориентированного автоматического синтеза уравнений движения механических систем [2]. Алгоритмизации составления математических моделей с помощью компьютера посвящено много работ [1–4 и др.].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01-97512 p_центр_a).