

References

1. Babkin A. S. *Metody resheniya zadach v tehnologicheskikh SAPR svarochnogo proizvodstva: Obzor* (Methods for solving problems in the CAD technology of welding production: Review), *Svarochnoe Proizvodstvo*, 1996, no. 4, pp. 20–23 (in Russian).
2. Ivanov V. P., Lin'kov V. S., Cherneckij R. I. *Specializirovannaja avtomatika dlja robotizirovannykh svarochnykh kompleksov* (Specialized equipment for robotized welding complexes), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2015, no. 5, pp. 116–121 (in Russian).
3. Nguen D. K., Lubenko V. N. *Osobennosti robotizacii svarochnogo proizvodstva v sudostroenii* (Features of robotics welding production in shipbuilding), *Vestnik AGTU*, 2008, no. 2, pp. 149–155 (in Russian).
4. Parsheva E. A. *Decentralizovannoe robastnoe upravlenie mnogozvennym manipulatorom svarochnogo proizvodstva* (Decentralized robust control of multilink manipulator for welding production), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2010, no. 2, pp. 29–35 (in Russian).
5. Avetisjan Yu. A., Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Rodichev V. A. *Matematicheskie modeli i algoritmy operativnogo upravlenija processami likvidacii chrezvychajnykh situacij* (Mathematical models and algorithms for operational process control of emergency response), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2009, no. 11, pp. 43–47 (in Russian).
6. Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Fominyh D. S., San'kova A. B. *Modeli i algoritmy sistemy operativnogo upravlenija processom formovanija listovogo stekla* (Models and algorithms for operational control system of forming flat glass process), *Avtomatizacija i sovremennye tehnologii*, 2007, no. 12, pp. 16–24 (in Russian).
7. Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Cvirkun A. D. *Upravlenie v cheloveko-mashinnykh sistemah s avtomatizirovannoj proceduroj korekcii celej* (Control of human-machine systems with automated procedure of purposes correction), *Avtomatika i Telemekhanika*, 1998, no. 7, pp. 168–175 (in Russian).
8. Rezhnikov A. F., Shraj Yu. K., Kushnikov V. A., Donin S. G. *Operativnaja identifikacija i upravlenie rezhimami ekspluatacii energosistem predprijatija* (Operational identification and control of operation of power systems mode of enterprise), *Pribory i Sistemy Upravlenija*, 1994, no. 5, pp. 12–15 (in Russian).
9. Sajutin A. V., Kushnikov V. A. *Osobennosti primeneniya metoda analiza glavnykh komponent dlja obespechenija effektivnoj raboty energosbytovoj organizacii* (Features of the application of the principal component analysis method to ensure the efficient operation of power sales organization), *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta*, 2009, vol. 1, no. 1 (37), pp. 99–104 (in Russian).
10. Shlychkov E. I., Fominyh D. S., Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F. *Avtomatizirovannaja sistema situacionnogo upravlenija processom formovanija listovogo stekla* (Automated system of situational control of flat glass molding process), *Avtomatizacija i Sovremennye Tehnologii*, 2006, no. 8, pp. 3–11 (in Russian).
11. Shcherbakov M. A., Kushnikov V. A. *Modeli i algoritmy sistemy upravlenija avarijnymi situacijami pri proizvodstve stekla* (Models and algorithms of emergency control system in the production of glass), *Vestnik Saratovskogo Gosudarstvennogo Tehniceskogo Universiteta*, 2011, no. 2 (55), Ed. 1, pp. 196–199 (in Russian).

УДК 681.513 + 004.94

DOI: 10.17587/mau.18.333-340

И. А. Рыбин, аспирант, intiret@gmail.com, В. Г. Рубанов, д-р техн. наук, проф., rubanov@intbel.ru, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород

Математическая модель системы управления мобильного транспортного средства*

Представлена математическая модель системы управления движением транспортного средства, имеющего шасси с двумя независимыми ведущими колесами. Модель, учитывающая положение колесного средства относительно заданной трассы, построена с использованием аппарата передаточных функций, что позволяет применять методы как классической, так и современной теории управления для синтеза устройств управления.

Ключевые слова: мобильный робот, транспортное средство, система управления, модель, передаточная функция, траектория движения

Введение

Одной из областей применения мобильных роботов являются транспортно-складские операции на производстве, в которых требуется организовать бесперебойную доставку материалов, инструментов, заготовок к обрабатывающим станкам и своевременную отгрузку готовой продукции на склад. Использование средств навигации, автоматизации и управления позволяет создавать автоматически управляемые транспортные средства (AGV — Automated Guided Vehicle) [1], интеграция которых в систему управления предприятием позволяет сократить время производства, снизить себестоимость продукции, исключить человеческий фактор и участие человека на опасных участках, обеспечить гибкость при переходе на другие виды продукции.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта N 14-41-08044 "p_офи_m".

Среди многообразных видов AGV-средств распространены колесные робокары — предназначенные для перевозки грузов роботизированные тележки, шасси которых может иметь различную конфигурацию. Классификация типов шасси приведена в работе [2], где также рассматриваются способы задания трассы движения мобильных роботов, средства их очувствления и приведения в движение.

При разработке систем управления транспортными средствами следует учитывать множество факторов, влияющих на их работу. Математическое и, как следствие, компьютерное моделирование позволяет осуществить анализ системы управления, а также синтез управляющего устройства без необходимости проведения дорогостоящих экспериментов с физическим объектом. Существует большое число моделей транспортных средств, каждая из которых строится на некоторых предположениях и, соответственно, имеет свои преимущества и недостатки.

В работе [3] рассматривается модель трехколесного мобильного робота с двумя управляемыми ведущими колесами, движение которого описывается в матричном виде с использованием уравнений Лагранжа—Максвелла для электромеханической системы. Для аналогичной трехколесной схемы шасси в статье [4] исследована модель, построенная на основе уравнений движения корпуса роботизированного средства и уравнений, отражающих электромеханические процессы, характерные для двигателей постоянного тока с редукторами, вращающих ведущие колеса.

Приведенные модели позволяют структурно представить систему управления транспортного средства, а применение методов классической теории управления для их анализа затруднительно. С этой точки зрения удобной в использовании является представленная в статье [5] структурная схема системы управления боковым отклонением робота от трассы, являющаяся основой математического обеспечения испытательного стенда, описанного в патенте РФ [6]. Основой структурной схемы является модель в виде передаточной функции транспортного средства при его боковом движении из монографии [7], в которой также получена передаточная функция для продольного движения.

Последние указанные модели непосредственно связаны с положением мобильного средства относительно заданной трассы, однако не демонстрируют его движение в пространстве. Кроме того, подсистемы управления боковым и продольным движением колесного робота являются взаимосвязанными, что учитывается в предложенной далее обобщенной модели системы управления движением мобильного транспортного средства.

Постановка задачи исследования

Рассмотрим робота с четырехколесной ромбовидной схемой шасси с двумя ведущими колесами 4 и 11, расположенными на поперечной оси, и двумя опорными колесами 8 и 13 на продольной оси 1 (рис. 1). Такую схему шасси имеют, например, AGV-средства, применяемые на заводе BMW в Лейпциге [8, 9]. Расположим на продольной оси мобильной платформы на расстоянии d от центра

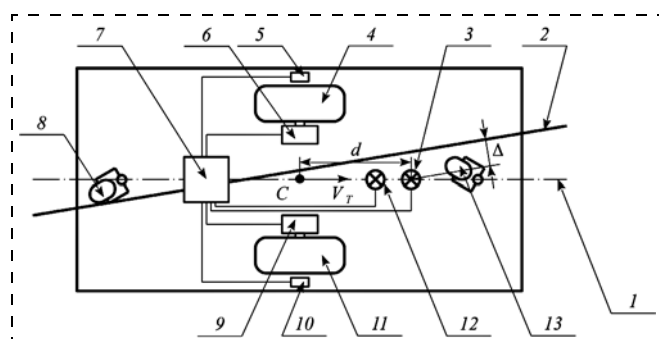


Рис. 1. К построению математической модели робота с ромбовидной схемой шасси

масс C датчик 3, измеряющий боковое отклонение Δ робота от заданной трассы 2. Трасса, вдоль которой движется робот, может иметь оптический (в виде нарисованной линии) или индуктивный способ задания. Продольную скорость движения центра масс обозначим V_T .

Траектория движения транспортного средства определяется изменением во времени скоростей вращения ведущих колес 4 и 11, каждое из которых приводится в движение посредством двигателя постоянного тока с понижающими редукторами 6, 9, соответственно. Последний может быть конструктивно выполнен совместно с двигателем и служит для увеличения мощности на выходном валу, соединяемом с колесом. Скорость вращения двигателей регулируется бортовым устройством управления 7, формирующим воздействия на основании сигналов от датчика бокового отклонения 3 и датчиков скоростей вращения колес 5 и 10 при использовании выбранного закона или алгоритма управления. Приближение к точкам на трассе, в которых должна происходить остановка транспортного средства для погрузки или разгрузки, определяется бортовым устройством управления по сигналу от датчика 12, который распознает наличие маркера, расположенного на некотором расстоянии до точки останова.

Задача исследования состоит в получении для выбранной схемы транспортного средства математической модели системы управления, которая обладает следующими свойствами:

- учитывает продольное и боковое движение относительно заданной трассы, а также взаимосвязь этих двух движений;
- отражает структуру системы управления транспортного средства;
- позволяет осуществлять анализ и синтез управляющих устройств методами классической теории управления;
- отображает движение мобильного средства в пространстве.

Построение модели проведем при следующих упрощениях, которые используются, например, в работах [4, 10–12]:

- робот движется по гладкой поверхности в горизонтальной плоскости;
- эффекты, связанные с динамическим перераспределением нагрузки на колеса при маневрировании, не учитываются;
- корпус транспортного средства является абсолютно жестким;
- отсутствует проскальзывание при движении всех колес;
- не учитывается влияние ведомых колес на направление движения.

Метод решения задачи исследования

Представим в каждый момент времени движение робота относительно заданной трассы в виде двух взаимосвязанных движений: бокового, перпен-

дикулярного к трассе, и продольного, сонаправленного ей. Будем полагать, что управление каждым из рассматриваемых движений осуществляется по своему каналу системы управления.

Заданием для подсистемы управления боковым отклонением является нулевое расстояние центра масс робота до трассы. При наличии отклонения его значение определяется датчиком, который может иметь различную конструкцию в зависимости от способа организации трассы. Пример датчика при индуктивном задании трассы приведен в статье [13]. В случае оптического задания трассы отклонение может определяться по разности показаний двух аналоговых датчиков, один из которых расположен левее, а другой — правее трассы. Ошибка рассогласования, соответствующая боковому отклонению, преобразуется бортовым устройством управления в сигнал ШИМ. Последовательность импульсов, подаваемых на левый двигатель, может иметь скважность, отличную от скважности импульсов, подаваемых на правый двигатель, т. е. средние значения управляющих напряжений левого и правого двигателей в общем случае различны. Таким образом, можно рассмотреть на выходе устройства усиления разность средних значений управляющих напряжений, подаваемых в виде сигнала ШИМ на двигатели постоянного тока. Разность средних значений напряжений создает разность скоростей вращения двигателей, редукторов и, соответственно, ведущих колес, что приводит к повороту мобильной платформы относительно ее центра масс и изменению бокового отклонения. Описанный процесс управления боковым отклонением представим в виде функциональной схемы, изображенной на рис. 2.

Используя известные из работ [14–16] передаточные функции элементов функциональной схемы и применяя преобразование Лапласа для сигналов, получим структурную схему подсистемы управления боковым отклонением (рис. 3).

Далее рассмотрим управление продольным движением, которое осуществляется в двух режимах. В первом из них происходит управление продольной скоростью, когда робот движется по прямолинейным участкам или участкам поворотов трассы. Второй режим предполагает управление продольным положением транспортного средства в местах останова для осуществления погрузочно-разгрузочных операций.

Процесс управления продольной скоростью представим в виде функциональной схемы (рис. 4). Заданием для соответствующей подсистемы является значение скорости, которое необходимо поддерживать при движении на текущем участке трассы.

Процесс управления продольной скоростью представим в виде функциональной схемы (рис. 4). Заданием для соответствующей подсистемы является значение скорости, которое необходимо поддерживать при движении на текущем участке трассы.

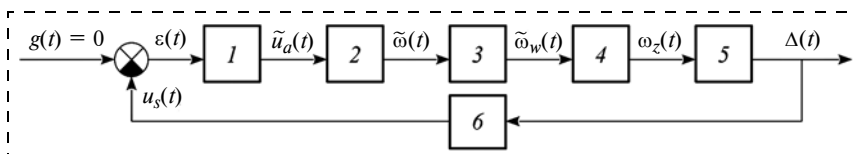


Рис. 2. Функциональная схема подсистемы управления боковым отклонением: 1 — усилительное устройство; 2 — двигатели; 3 — редукторы; 4 — шасси; 5 — робот; 6 — датчик бокового отклонения; $g(t)$ — заданное боковое отклонение; $\varepsilon(t)$ — сигнал рассогласования; $\bar{u}_a(t)$ — разность средних значений напряжений, подаваемых на двигатели; $\bar{\omega}_w(t)$ — разность скоростей вращения валов двигателей; $\bar{\omega}_z(t)$ — разность скоростей вращения ведущих колес; $\omega_z(t)$ — скорость поворота платформы относительно центра масс; $u_s(t)$ — напряжение на выходе датчика бокового отклонения

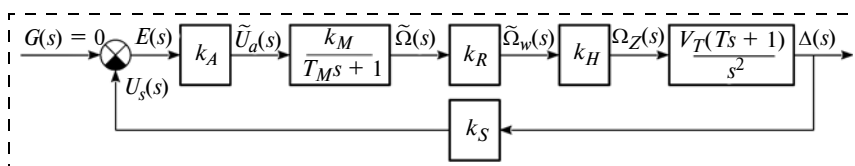


Рис. 3. Структурная схема подсистемы управления боковым отклонением: k_A — коэффициент передачи усилителя; k_M , T_M — коэффициент усиления и постоянная времени двигателей, зависящая от сопротивления двигателям при повороте робота; k_R — коэффициент передачи редуктора; k_H — коэффициент передачи шасси; T — постоянная времени мобильной платформы, равная $T = d/V_T$; k_S — коэффициент передачи датчика

Реальная скорость движения рассчитывается по измеренным датчиками скоростям вращения двух ведущих колес и зависит от суммы этих скоростей. Разность между заданной и реальной продольными скоростями дает ошибку рассогласования, поступающую на усилительное устройство. На выходе усилителя рассмотрим сумму управляющих сигналов, которые представляют собой среднее значение напряжения, подаваемого в виде ШИМ-сигнала на двигатели. От суммы средних значений управляющих напряжений зависит сумма скоростей вращения валов двигателей, выходных валов редукторов и, соответственно, ведущих колес. Наконец, сумма скоростей вращения колес определяет продольную скорость робота.

Структурная схема системы управления продольной скоростью, полученная на основе функциональной схемы, после приведения ее к виду

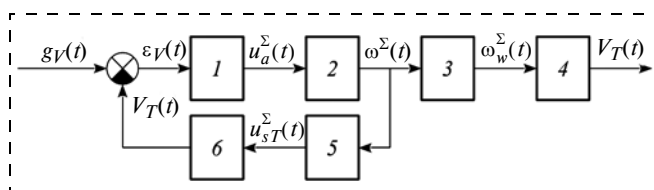


Рис. 4. Функциональная схема системы управления продольной скоростью:

1 — усилительное устройство; 2 — двигатели; 3 — редукторы; 4 — шасси; 5 — датчик угловой скорости; 6 — блок вычисления продольной скорости; $g_V(t)$ — заданное значение продольной скорости; $\varepsilon_V(t)$ — сигнал рассогласования; $u_a^\Sigma(t)$ — сумма средних значений напряжений, подаваемых на двигатели; $\omega_w^\Sigma(t)$ — сумма скоростей вращения валов двигателей; $\omega_z^\Sigma(t)$ — сумма скоростей вращения ведущих колес; $V_T(t)$ — продольная скорость; $u_{sT}^\Sigma(t)$ — сумма напряжений датчиков, измеряющих скорости вращения валов

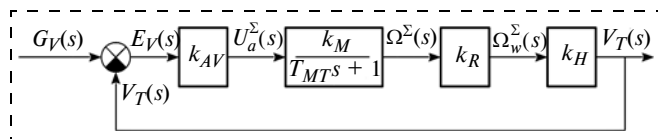


Рис. 5. Структурная схема подсистемы управления продольной скоростью с единичной отрицательной обратной связью:
 k_{AV} — коэффициент передачи усилителя подсистемы управления продольной скоростью; k_M , T_{MT} — коэффициент усиления и постоянная времени двигателя, зависящая от сопротивления двигателям при продольном движении; k_R — коэффициент передачи редуктора; k_H — коэффициент передачи шасси

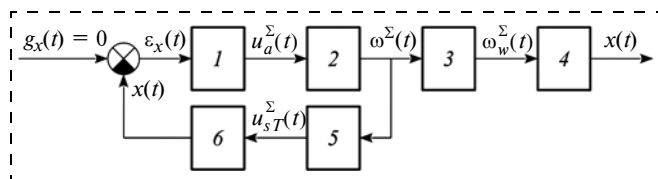


Рис. 6. Функциональная схема системы управления продольным положением:
 1 — усилительное устройство; 2 — двигатели; 3 — редукторы; 4 — шасси; 5 — датчик угловой скорости; 6 — блок вычисления пройденного расстояния; $g_x(t)$ — заданное расстояние от местоположения робота на трассе до точки останова; $\varepsilon_x(t)$ — сигнал рассогласования; $u_a^{\Sigma}(t)$ — сумма средних значений напряжений, подаваемых на двигатели; $\omega^{\Sigma}(t)$ — сумма скоростей вращения валов двигателей; $\omega_w^{\Sigma}(t)$ — сумма скоростей вращения ведущих колес; $x(t)$ — пройденный путь от момента начала работы подсистемы управления продольным положением; $u_{sT}^{\Sigma}(t)$ — сумма напряжений датчиков, измеряющих скорости вращения валов

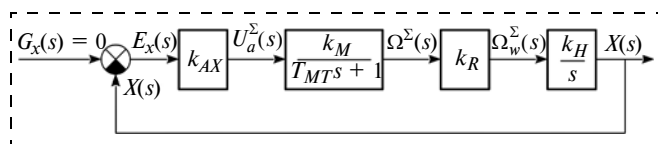


Рис. 7. Структурная схема подсистемы продольного позиционирования с единичной отрицательной обратной связью:
 k_{AX} — коэффициент передачи усилителя подсистемы управления продольного позиционирования; k_M , T_{MT} — коэффициент усиления и постоянная времени двигателя, зависящая от сопротивления двигателям при продольном движении; k_R — коэффициент передачи редуктора; k_H — коэффициент передачи шасси

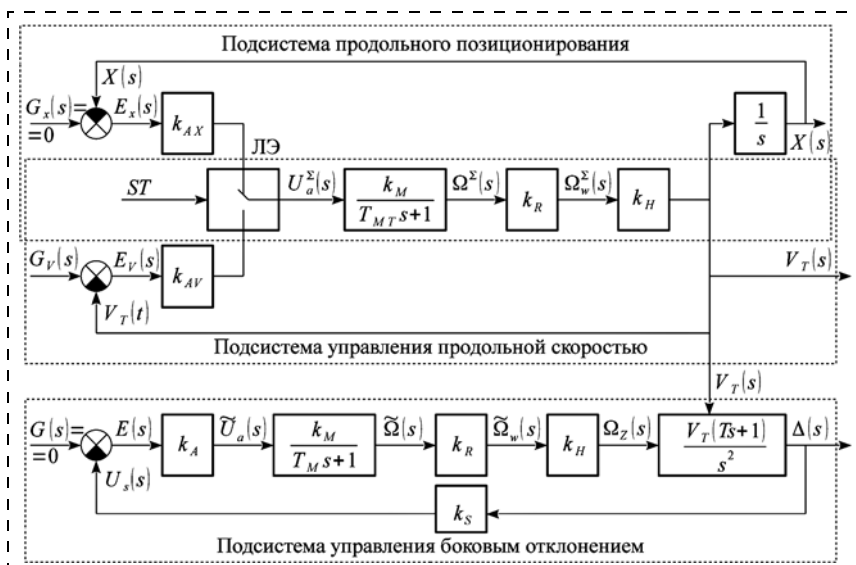


Рис. 8. Структурная схема обобщенной модели системы управления робота

замкнутой системы управления с единичной отрицательной обратной связью и преобразования сигналов по Лапласу представлена на рис. 5.

В случае управления продольным положением задающим сигналом является нулевое расстояние от местоположения робота на трассе до точки останова, а выходным — пройденный путь от момента начала работы подсистемы управления продольным положением до текущего момента времени. При этом значение пройденного пути вычисляется исходя из суммарной скорости двигателей колес, а ошибка рассогласования представляет собой реальное расстояние, которое осталось пройти до места останова. Основываясь на схеме управления продольной скоростью (см. рис. 4), с учетом указанных отличий составим функциональную схему подсистемы продольного позиционирования (рис. 6).

Как и ранее, для простоты анализа получена структурная схема подсистемы продольного позиционирования с единичной отрицательной обратной связью (рис. 7).

По полученным структурным схемам (см. рис. 3, 5, 7) сформируем обобщенную модель системы управления мобильным транспортным средством, учитывающую взаимосвязь продольного и бокового движений робота (рис. 8). Переключение би-стабильного логического элемента (ЛЭ) соответствует смене режима управления продольным движением с управления скоростью на управление положением и обратно. Такое переключение происходит по сигналу ST , формируемому датчиком приближения к маркеру останова.

Как видно, структурная схема обобщенной модели имеет в качестве выходных сигналов продольную скорость робота, которая при интегрировании дает пройденный путь по заданной трассе, и боковое отклонение от трассы. Такая модель полностью определяет положение транспортного средства относительно прямолинейного участка трассы. Для

учета имеющихся участков поворота трассы будем считать, что отклонение трассы от прямолинейного направления является возмущающим воздействием для подсистемы управления боковым отклонением робота (рис. 9).

Понятие отклонения от прямолинейного направления будем рассматривать как расстояние $\Delta_T(t_i)$ от точки, которая рассматривается в следующий момент времени t_{i+1} , на трассе до прямой, проходящей через точки трассы, соответствующие текущему t_i и предыдущему t_{i-1} моментам времени (рис. 10). При малом значении интервала времени $[t_{i-1}; t_i]$ отрезок, задающий текущее прямолинейное направление движения, будет приблизительно совпадать с участком кривой трассы.

Подача в качестве возмущающего воздействия нулевых и ненулевых

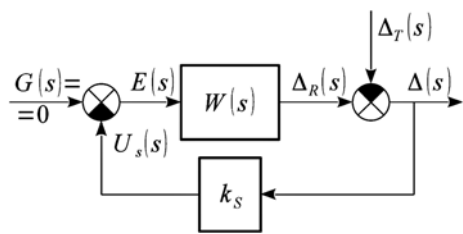


Рис. 9. Подсистема управления боковым отклонением с учетом возмущающего воздействия, являющегося следствием непрямолинейности трассы:

$W(s)$ — передаточная функция прямого канала подсистемы управления боковым отклонением; $\Delta_R(s)$, $\Delta_T(s)$, $\Delta(s)$ — преобразованные по Лапласу отклонение робота от прямолинейного направления движения, отклонение точки на трассе от прямолинейного направления и боковое отклонение робота от заданной трассы соответственно

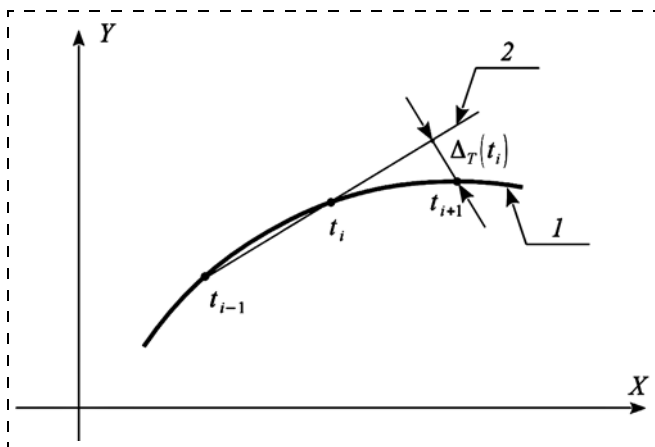


Рис. 10. Рисунок, поясняющий понятие отклонения к прямолинейному направлению трассы:

1 — заданная трасса; 2 — прямолинейное направление трассы в момент времени t_i

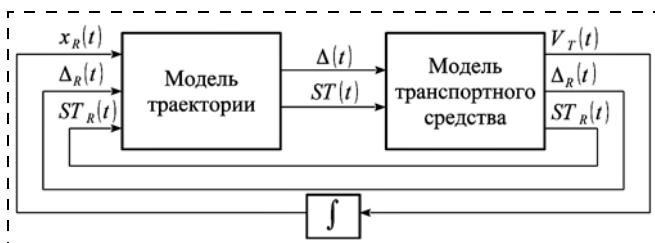


Рис. 11. Взаимосвязь модели трассы и обобщенной модели робота

значений, что соответствует прямолинейным и криволинейным участкам, позволяет моделировать задание различных конфигураций трассы.

Для компьютерного моделирования дополним модель трассы таким образом, чтобы в зависимости от текущего положения транспортного средства, которое определяется пройденным расстоянием x_R , она предоставляла для модели робота следующую информацию:

- боковое отклонение от трассы Δ в текущий момент времени, которое равно разности $\Delta_R - \Delta_T$;
- значение логического сигнала ST выбора управления продольной скоростью или продольным положением.

Вместе с тем, модель движения транспортного средства, кроме величины x_R , должна предоставлять для модели трассы:

- значение Δ_R бокового отклонения робота от прямолинейного движения;
- значение логического сигнала ST_R , соответствующего тому, произошла ли полная остановка робота, т. е. готово ли транспортное средство к выполнению погрузочно-разгрузочной операции.

Взаимосвязь модели трассы и модели мобильного робота показана на рис. 11.

Располагая моделью пространственной конфигурации трассы и моделью движения робота относительно трассы, можно путем несложных математических действий определять положение робота в пространстве.

Интерпретация и иллюстрация полученных результатов исследования

Приведем примеры построения траектории движения транспортного средства с использованием разработанной модели. Представленные далее результаты получены путем компьютерного моделирования в среде MATLAB.

На рис. 12 показано движение робота на участке торможения перед точкой останова с начальным боковым отклонением от трассы 0,2 м. Другие начальные условия: расстояние от точки начала торможения до точки останова — 1 м; продольная скорость — нулевая.

На рис. 13 продемонстрировано использование модели для построения движения робота вдоль прямолинейного участка траектории с управлением по продольной скорости, заданием для которой является значение 0,5 м/с. Начальные условия: продольная скорость — нулевая, боковое отклонение — 0,2 м.

График на рис. 14 является результатом моделирования движения вдоль трассы, каждая точка которой на очередном шаге моделирования имеет отклонение 0,004 м. Другие параметры моделиро-

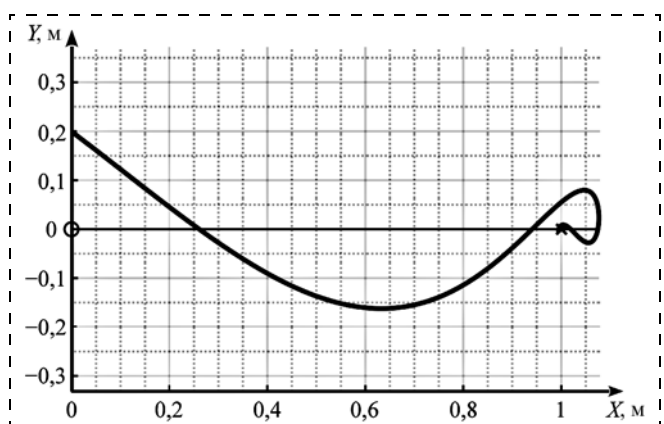


Рис. 12. Движение робота относительно прямолинейного участка торможения:

○ — маркер начала позиционирования; × — точка останова робота

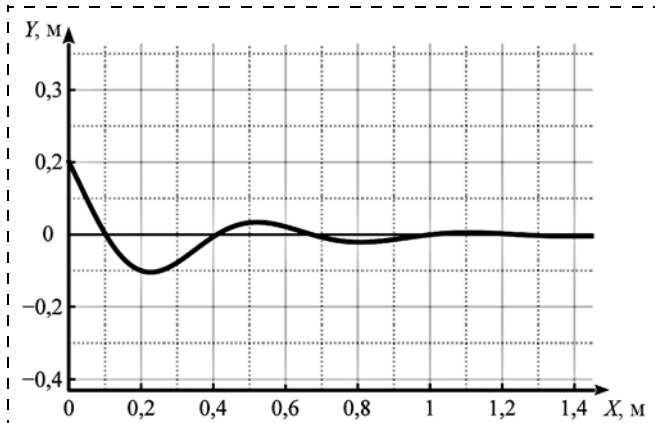


Рис. 13. Траектория движения робота относительно прямолинейного участка при управлении продольной скоростью

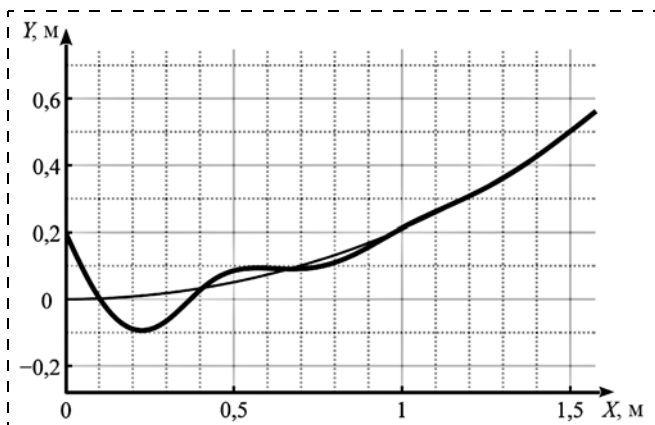


Рис. 14. Траектория движения робота по криволинейному участку трассы при ненулевом начальном боковом отклонении

вания: начальное боковое отклонение 0,2 м, начальное и заданное значение продольной скорости соответственно 0 м/с и 0,5 м/с.

Комбинируя участки прямолинейного движения и участки поворота, можно исследовать движение робота относительно сложной трассы, состоящей из участков прямолинейного движения и участков поворота, а также точек останова транспортного средства для осуществления погрузочно-разгрузочных операций.

Кроме того, если пренебречь взаимосвязью подсистем управления движением (см. рис. 8), легко можно получить показатели качества процесса управления для каждой из них в отдельности. На рис. 15 показан полученный с помощью разработанной модели процесс компенсации бокового отклонения при его начальном значении, равном максимально допустимому 0,2 м, и продольной скорости 0,5 м/с.

Как видно из приведенного графика, процесс управления боковым отклонением обладает достаточно большим перерегулированием σ , временем регулирования T_p и колебательностью. Управление продольной скоростью и положением также имеет недостатки. Так, процесс набора скорости роботом от нуля до заданного значения, равного 1 м/с

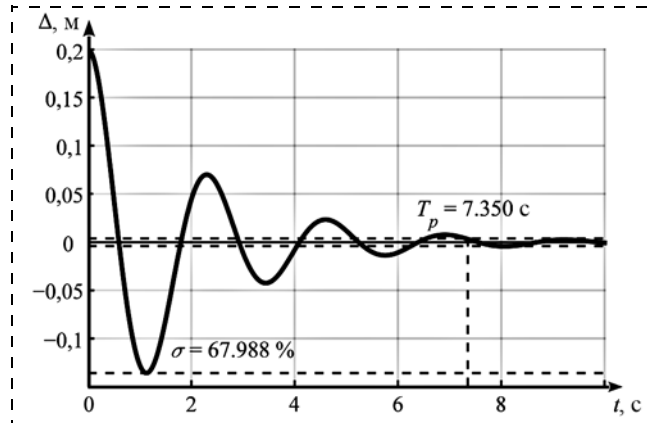


Рис. 15. Реакция подсистемы управления боковым отклонением на ненулевое начальное отклонение от заданной трассы

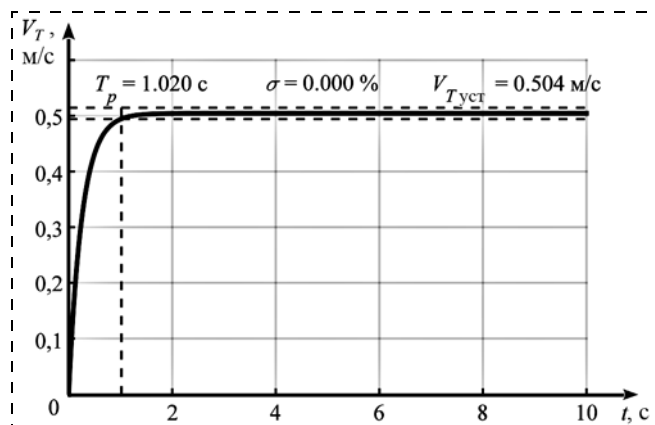


Рис. 16. Переходный процесс подсистемы управления продольной скоростью

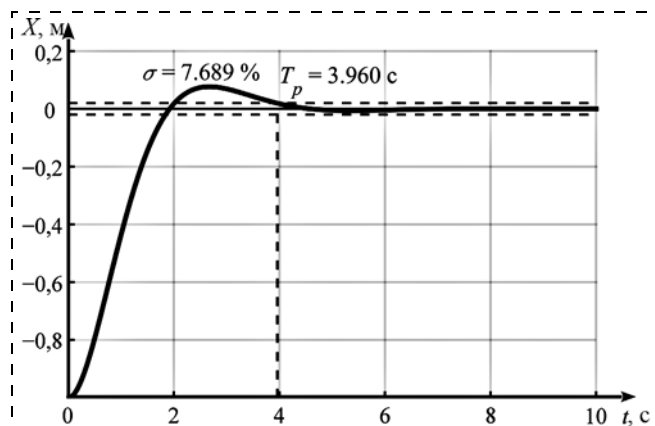


Рис. 17. Переходный процесс подсистемы управления продольным положением

(рис. 16), имеет статическую ошибку, поскольку значение скорости в установившемся режиме $V_{Tуст} = 0,504$ м/с меньше задания.

Процесс управления по положению представлен на рис. 17. Здесь в момент включения подсистемы позиционирования расстояние до точки требуемого останова равно 1 м.

Наличие перерегулирования на рис. 17 соответствует необходимости реверсивного движения транспортного средства и является нежелательным.

Заключение

Достоинством разработанной модели управления движением четырехколесного транспортного средства с двумя ведущими и двумя опорными колесами является декомпозиция системы управления на подсистемы, каждая из которых представляется в виде структурной схемы.

Проведенный анализ выявил следующие недостатки, которые предполагается устранить путем синтеза и внедрения регуляторов для каждой подсистемы в отдельности: управление боковым отклонением обладает большими колебательностью и временем регулирования, управление продольной скоростью имеет статическую ошибку, а для управления положением недостаток заключается в наличии перерегулирования. При этом за счет представления подсистем в виде структурных схем имеется возможность синтеза законов управления методами как классической, так и современной теории управления.

Другое достоинство модели заключается в возможности построения для трассы любой конфигурации, заданной в отклонениях траектории движения мобильного робота в пространстве с учетом взаимосвязи подсистем.

Таким образом, полученная модель полезна для предварительного исследования спроектированных законов управления движения робота.

Список литературы

1. Berman S., Schechtman E., Edan Y. Evaluation of Automatic Guided Vehicle Systems // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2008. doi: 10.1016/j.rcim.2008.02.009.
2. Siegwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D. Introduction to autonomous mobile robots. Publishing house of Massachusetts Institute of Technology, 2004. 321 p.

3. Martynenko Yu. G. Motion Control of Mobile Wheeled Robots // Journal of Mathematical Sciences. 2007. Vol. 147, N. 2. P. 6569–6606.
4. Аль-Еззи А. Исследование пусковых режимов колесного мобильного робота // Известия ЮЗГУ. Техника и технологии. 2011. № 1. С. 43–52.
5. Рыбин И. А., Рубанов В. Г., Дуюн Т. А. Способ исследования движения мобильного робота на стационарной установке удаленного доступа // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2014. № 11. С. 14–21.
6. Патент РФ № 2013104803/11, 27.08.2015. Рубанов В. Г., Рыбин И. А., Кижук А. С., Дуюн Т. А. Стенд и способ исследования движения робота / Патент России № 2561405. 2013. Бюл. № 24.
7. Рубанов В. Г., Кижук А. С. Мобильные микропроцессорные системы автоматизации транспортно-складских операций. Мобильные робототехнические системы. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. 289 с.
8. Ullrich G. Automated Guided Vehicle Systems. A Primer with Practical Applications. Berlin: Springer, 2015. 227 p. DOI 10.1007/978-3-662-44814-4.
9. URL: <http://www.ds-automotion.com/en/automotive/videos.html> (дата обращения: 26.03.2016).
10. Ткачев С. Б. Реализация движения колесного робота по заданной траектории // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Естественные науки. 2008. № 2. С. 33–55.
11. Чувейко М. В., Путов А. В. Математическое моделирование интеллектуальной системы управления и навигации мобильного робота // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: www.science-education.ru/106-7573 (дата обращения: 09.01.2014).
12. Мартыненко Ю. Г. Динамика мобильных роботов // Со-ровский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 5. С. 110–115.
13. Рубанов В. Г., Кижук А. С. Комбинированный индукционный датчик бокового отклонения и позиционирования мобильного робота // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. № 11. С. 39–43.
14. Луакурва Дж. П. А. Автоматизация транспортно-складских операций технологического процесса производства асбестоцементных изделий: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06. Белгород, 2008. 167 с.
15. Волков Н. И., Миловзоров В. П. Электромашинные устройства автоматики. М.: Высш. шк., 1986. 335 с.
16. Подлесный Н. И., Рубанов В. Г. Элементы систем автоматического управления и контроля. К: Выща шк., 1991. 461 с.

Mathematical Model of a Mobile Vehicle Control System

I. A. Rybin, Postgraduate Student, intiret@gmail.com, V. G. Rubanov, D. Sc., Professor, rubanov@intbel.ru, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, 308036, Russian Federation

Corresponding author: Rybin Iliya A., Postgraduate Student
Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,
Belgorod, 308036, Russian Federation, e-mail: intiret@gmail.com

Received on October 26, 2016
Accepted on November 11, 2016

The paper presents a mathematical model of a motion control system for a vehicle with a chassis of two independent drive wheels. The active wheels are driven by DC motors through the reducers. The vehicle has a wheel speed sensor and a sensor of the lateral deviation from the predetermined route, a signal from which is transmitted to the control unit. The model takes into account the position of the wheeled mobile vehicle in relation to a guide path. It is built with the transfer functions, which allow application of the methods of both classical and modern control theory for the synthesis of the control devices. The model of the vehicle describes three interrelated subsystems, which control the lateral deviation, the longitudinal velocity and the position. Research of each subsystem separately showed their drawbacks. The lateral deviation control has a large overshoot and settling time. The longitudinal speed control has an error in steady state. The drawback of the position control is the presence of an overshoot, which demands the reverse engines. These drawbacks can be eliminated by introduction of the control devices into each of the subsystems. Also, the model envisages a trajectory of the vehicle motion in the coordinate plane. Besides, it provides for a model of the trace, defined in the deviations from the straight direction. This model takes into account the presence of the straight sections, the turning sections and the positioning points on the trace. The developed model is useful for a preliminary research of the synthesized control laws of the vehicle motion.

Keywords: mobile robot, vehicle, control system, model, transfer function, trajectory of motion

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task of RF 2.1396.2017/IF "Development of methods

for ensuring the survivability of intelligent on-board control systems for unmanned vehicles".

For citation:

Rybin I. A., Rubanov V. G. Mathematical Model of a Mobile Vehicle Control System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 5, pp. 333–340.

DOI: 10.17587/mau.18.333-340

References

1. **Berman S., Schechtman E., Edan Y.** Evaluation of Automatic Guided Vehicle Systems, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2008, doi: 10.1016/j.rcim.2008.02.009.
2. **Sieglwart R., Nourbakhsh I. R., Scaramuzza D.** Introduction to autonomous mobile robots, Publishing house of Massachusetts Institute of Technology, 2004, 321 p.
3. **Martynenko Yu. G.** Motion Control of Mobile Wheeled Robots, *Journal of Mathematical Sciences*, 2007, vol. 147, no. 2, pp. 6569–6606.
4. **Al'-Ezzi A.** *Izvestiya YuZGU. Tekhnika i Tekhnologii*, 2011, no. 1, pp. 43–52 (in Russian).
5. **Rybin I. A., Rubanov V. G., Duyun T. A.** *Pribory i Sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika*, 2014, no. 11, pp. 14–21 (in Russian).
6. **Rubanov V. G., Rybin I. A., Kizhuk A. S., Duyun T. A.** Patent RF № 2013104803/11, 27.08.2015. Byul. № 24 (in Russian).
7. **Rubanov V. G., Kizhuk A. S.** *Mobil'nye mikroprotsessornye sistemy avtomatizatsii transportno-skladskikh operatsii. Mobil'nye robototekhnicheskie sistemy* (Mobile microprocessor systems automate the transport and warehousing operations. Mobile robotic systems), Bel-

gorod, Publishing house of BG TU im. V. G. Shukhova, 2011, 289 p. (in Russian).

8. **Ullrich G.** Automated Guided Vehicle Systems. A Primer with Practical Applications, Berlin, Springer, 2015, 227 p. DOI 10.1007/978-3-662-44814-4.

9. **Available** at: <http://www.ds-automotion.com/en/automotive/videos.html> (data obrashcheniya: 26.03.2016).

10. **Tkachev S. B.** *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Estestvennye Nauki*, 2008, no. 2, pp. 33–55 (in Russian).

11. **Chuveiko M. V., Putov A. V.** *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*, 2012, no. 6, available at: www.science-education.ru/106-7573 (date of access 09.01.2014) (in Russian).

12. **Martynenko Yu. G.** *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*, 2000, vol. 6, no. 5, pp. 110–115 (in Russian).

13. **Rubanov V. G., Kizhuk A. S.** *Izvestiya Vuzov. Priborostroenie*, 2003, no. 11, pp. 39–43 (in Russian).

14. **Luakurva Dzh. P. A.** *Avtomatizatsiya transportno-skladskikh operatsii tekhnologicheskogo protsessa proizvodstva asbestotsementnykh izdelii* (Automation of the transport and storage operations of the technological process of production of asbestos cement products): dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.13.06, Belgorod, 2008, 167 p. (in Russian).

15. **Volkov N. I., Milovzorov V. P.** *Elektromashinnye ustroystva avtomatiki* (Electric machinery automation devices), Moscow, Vysshaya shkola, 1986, 335 p. (in Russian).

16. **Podlesnyi N. I., Rubanov V. G.** *Elementy sistem avtomaticheskogo upravleniya i kontrolya* (Elements of automatic control and monitoring systems), Kiev, Vyshcha shk., 1991, 461 p. (in Russian).

УДК 681.5.09

DOI: 10.17587/mau.18.340-345

А. В. Гулай, канд. техн. наук, зав. кафедрой, is@bntu.by, **В. М. Зайцев**, канд. техн. наук, доц., is@bntu.by, Белорусский национальный технический университет, Минск

Кодовое разделение логических каналов передачи транзакций в интеллектуальных мехатронных системах

Предложен численный метод ускоренного выделения битов информационных потоков из бит-кадров при кодовом разделении логических каналов передачи транзакций на основе использования функций Уолша в интеллектуальных мехатронных системах. Проанализирована схема кодового разделения потоков битов за счет введения в мехатронную систему интеллектуальных мультиплексоров потоков битов источников информации на передающей стороне канала и интеллектуальных сепараторов потоков битов на приемной стороне. Особенность данной схемы кодового разделения логических каналов заключается в том, что она полностью реализуется за счет использования программных средств в составе интеллектуальной мехатронной системы.

Ключевые слова: интеллектуальные мехатронные системы, каналы передачи транзакций, кодовое разделение каналов, обработка бит-кадров, функции Уолша

Введение

Развитие информационных технологий и средств мехатроники привело к построению систем комплексного автоматизированного управления различными производственно-технологическими процессами. Системы управления технологиями и производствами объединяют также группы разнообразных интеллектуальных устройств. Такие системы включают, как правило, интеллектуальные сенсорные устройства, ситуационные центры и центры выработки управленческих решений, а также функционально ориентированные исполнительные механизмы с дистанционным управлением. Современный производственно-технологический объект, как правило, насыщен радиоэлектронным оборудованием автоматизированного контроля и

управления, а также кабельными линиями связи и радиочастотными каналами передачи транзакций.

В большинстве проектов традиционно предусматривается раздельное использование канальных ресурсов источниками и потребителями информации, что сопровождается необходимостью прокладки огромного числа линий связи или выделением достаточно широкого спектра частот из состава весьма дефицитного частотного ресурса. Острота указанной проблемы в значительной мере может быть снижена за счет применения принципов кодового разделения (уплотнения) каналов передачи информации — CDMA (Code Division Multiple Access) [1–6]. Однако большинство проектных решений в этой области относится к сфере построения средств сотовой связи и в той или иной мере повторяет основные положения международной рекомендации