

УДК 62-50

Л.А. Краснодубец, д-р техн. наук**А.А. Дмитришин***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, д. 33, г. Севастополь, 299053**E-mail: lakrasno@gmail.com***ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕСНЫМ РОБОТОМ «ROBOTINO»**

Предложен закон терминального адаптивного управления колесным роботом, построенный на основе решения задачи следования назначенной траектории с требуемым временем достижения назначенной точки на плоскости. Показано, что для синтеза параметров соответствующего цифрового регулятора можно использовать простую модель объекта управления с неизвестным параметром. Разработана программа, реализующая предложенный закон управления на бортовом компьютере в режиме реального времени под управлением операционной системы Linux.

Ключевые слова: терминальное управление, адаптивные свойства, закон управления, синтез, моделирование, программное обеспечение, колесный робот.

Ведение. В сфере работы транспортных систем одними из ключевых логистических параметров является время и качество доставки груза. На пути повышения качества работы таких систем стоит задача соблюдения временных рамок доставки с учетом высокой точности движения по планируемому маршруту доставки.

В данной статье предлагается подход к решению этой задачи путем применения адаптивного терминального управления колесным роботом [1] как элементом транспортной системы, обеспечивающей технологический процесс в условиях сборочного цеха. В рассматриваемом случае под терминальным управлением понимается перемещение объекта управления из начального положения в заданное конечное по назначенной траектории за требуемое время. Адаптивные свойства предлагаемого терминального управления позволяют применять его к роботам с различными динамическими свойствами и грузовой нагрузкой.

Объект исследования – колесный робот Robotino, обладая тремя степенями свободы, может двигаться в любом направлении с любой ориентацией. Благодаря этому он может быть удобным для использования в качестве погрузчика в тесных помещениях, выполняя перемещения на горизонтальной плоскости из одной точки в другую. Известная система управления, состоящая из регулятора с ПИД-законом управления и системы позиционирования, имеет существенный недостаток – необходимость настройки ПИД-регулятора при изменении динамических параметров робота, вызванных изменением массы транспортируемого груза, а также отсутствие устройства, определяющего временной график движения.

Целью настоящей работы является разработка алгоритмического и программного обеспечения адаптивной системы терминального управления колесной платформой (КП) робота Robotino, параметры динамической модели которой не определены. При этом терминальное управление обеспечивается адаптивной системой траекторного управления по специальной траектории, задающей не только путь на плоскости, но и график движения, приводящего в терминальное положение. Предлагаемый подход к решению задачи траекторного управления КП отличается от известного [2,3] тем, что управляющая функция, вычисляемая в регуляторе на основе локальной оптимизации энергетического (кинетического) критерия, имеет физический смысл скорости. Это соответствует типу входных сигналов электропривода КП робота Robotino.

Построение терминального адаптивного закона управления. В качестве КП будем рассматривать систему приводов, размещенных на основании (платформе) робота Robotino, обеспечивающих при помощи роликонесущих колес [4] его перемещение в горизонтальной плоскости и вращательное движение относительно вертикальной оси. Такая конструкция КП обеспечивает возможность движения робота вдоль некоторой заданной траектории без использования вращательного движения (вокруг вертикальной оси, проходящей через центр масс). Таким образом, для решения задачи траекторного управления движением можно использовать 2 степени свободы соответственно по координатам x и y .

Управляющие воздействия на приводы КП подаются в виде сигналов требуемых скоростей v_x, v_y , которые используются как управляющие функции колесной платформы как объекта управления с симметричными каналами по координатам x и y , определяющим местоположение ее центра масс.

Пусть координаты центра масс определяются вектором $q = [x, y]^T$, а управляющая функция – вектором скоростей $u = v = [v_x, v_y]^T$. Траекторию назначенного движения зададим векторной функцией $\varphi(t) = [\varphi_x, \varphi_y]^T$.

Уравнение движения КП как системы с двумя степенями свободы можно представить в виде

$$A_m \ddot{q} + D \dot{q} = f, \quad (1)$$

где $f = [f_x, f_y]^T$ – вектор управляющих сил; $A_m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$ – матрица инерции;

$D = \begin{bmatrix} d_x & 0 \\ 0 & d_y \end{bmatrix}$ – матрица коэффициентов трения.

Поскольку управляющие функции для приводов колесной платформы Robotino имеют размерности скорости, то уравнение (1) можно преобразовать, интегрируя обе его части при нулевых начальных условиях, и с учетом того, что $f = A_m \dot{v}$. Имеем

$$\dot{q} + A_1 q = v, \quad t = t_0; q(t_0) = q_0; A_1 = A_m^{-1} D. \quad (2)$$

Критерий управления для основного контура представим в виде ошибки

$$\delta(t) = \varphi(t) - q(t). \quad (3)$$

Пусть цель управления $\delta \rightarrow 0$. При этом поведение вектора-ошибки представим в виде однородного дифференциального векторно-матричного уравнения первого порядка:

$$\dot{\delta} + H_0 \delta = 0, \quad \text{при } t \rightarrow \infty, \quad (4)$$

где H_0 – матрица коэффициентов, которые выбираются исходя из желаемого времени t_p переходного процесса вектора-ошибки при его стремлении к нулю.

Далее поставим задачу о траекторном управлении. Пусть требуется найти управление в форме обратной связи, которое обеспечит движение центра масс КП из начального состояния $t = t_0; q(t_0) = q_0$ вдоль траектории, заданной векторной функцией $\varphi(t)$. При этом векторная функция, характеризующая отклонение $\delta(t)$, должна подчиняться векторно-матричному уравнению (4). Мету отклонения определим квадратичной формой

$$E(v) = 0,5 e^T A e, \quad (5)$$

где $e = \dot{q}^* - \dot{q}(v)$ – невязка между требуемой скоростью движения КП по назначенной траектории и фактической, которая определяется управляющей вектор-функцией $v(t)$.

Выражение (5) при $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ по физическому смыслу соответствует нормированной по массе кинетической энергии. Требуемое значение скорости $\dot{q}^*$, необходимое для движения по назначенной траектории $\varphi(t)$, определяется соотношением

$$\dot{q}^* = \dot{\varphi} + H_0(\varphi - q), \quad (6)$$

которое получено из (4) при учете (3).

Оптимальное значение текущей управляющей вектор-функции $v(t)$, обеспечивающей движение центра масс КП по траектории $\varphi(t)$, найдем из условия минимума критериальной функции (5) методом скоростного градиента, который можно записать в виде дифференциального соотношения, в соответствии с которым управляющую вектор-функцию $v(t)$ можно найти из решения дифференциального векторно-матричного уравнения

$$\frac{dv^T}{dt} = - \frac{dE(v)}{dv} \Lambda, \quad (7)$$

где $\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} = \text{const}$ – характеризует скорость стремления значений критериальной функции $E(v)$ к $E_{\min}(v)$;

$\frac{dE(v)}{dv}$ – матрица строка как результат дифференцирования квадратичной формы (5).

Вычисляя производную в правой части (7) по правилу дифференцирования квадратичной формы с учетом (2), (5) и (6), можно получить искомый закон управления в дифференциальной форме

$$\frac{dv^T}{dt} = \{H_0(\varphi - q) + (\dot{\varphi} - \dot{q})\}^T \Lambda. \quad (8)$$

В системе Robotino сигналы управления КП, соответствующие линейным скоростям $v_x(t)$ и $v_y(t)$, должны быть представлены в дискретной форме. Поэтому закон управления (8) преобразуем к виду

$$v_x[(k+1)T] = v_x(kT) + T\lambda\{h_0[\varphi_x(kT) - x(kT)] + [\dot{\varphi}_x(kT) - \dot{x}(kT)]\}, \quad (9)$$

$$v_y[(k+1)T] = v_y(kT) + T\lambda\{h_0[\varphi_y(kT) - y(kT)] + [\dot{\varphi}_y(kT) - \dot{y}(kT)]\}, \quad (10)$$

полагая $kT \leq t < kT + T$ при $t \geq 0$ и $k = 0, 1, 2, \dots$,

где T – период дискретизации.

По формулам (9) и (10) можно построить структурную схему двухканального цифрового адаптивного регулятора, обеспечивающего движение центра масс КП по назначенной траектории $\varphi(t) = [\varphi_x, \varphi_y]^T$ в заданное терминальное положение на плоскости.

Построение аналитического выражения для траектории назначенного движения КП в терминальное положение. Представим искомую траекторию в виде полиномиальных функций

$$\varphi_x(t) = \sum_{k=0}^3 c_k t^k, \quad \varphi_y(t) = \sum_{k=0}^3 c_k t^k, \quad (11)$$

параметры которых c_k и g_k найдем, используя граничные условия в соответствии с [5].

Пусть ставится задача перевести КП, находящуюся в состоянии покоя в начале координатной плоскости, в точку с координатами $x = 2$ м и $y = 3$ м за время $t = 10$ с. Для расчета назначенной траектории зададим граничные условия в виде:

$$t_0 = 0 \text{ с}; \quad \varphi_x(t_0) = 0 \text{ м}; \quad \dot{\varphi}_x(t_0) = 0 \text{ м/с}; \quad \varphi_y(t_0) = 0 \text{ м}; \quad \dot{\varphi}_y(t_0) = 0 \text{ м/с}.$$

$$t_f = 10 \text{ с}; \quad \varphi_x(t_f) = 2 \text{ м}; \quad \dot{\varphi}_x(t_f) = 0 \text{ м/с}; \quad \varphi_y(t_f) = 3 \text{ м}; \quad \dot{\varphi}_y(t_f) = 0 \text{ м/с}.$$

С учетом приведенных граничных условий и выражения (10) можно записать уравнения, определяющие назначенную траекторию КП по координатам $x(t)$ и $y(t)$, а также уравнения для их производных следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x(t) &= 0,06t^2 - 0,004t^3 \\ \varphi_y(t) &= 0,09t^2 - 0,006t^3 \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_x(t) &= 0,12t - 0,012t^2 \\ \dot{\varphi}_y(t) &= 0,18t - 0,018t^2 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Таким образом, полученный закон управления позволяет решить задачу преобразования априорной и текущей информации о требуемой траектории и состоянии КП в управляющее воздействие для электропривода исполнительных механизмов (роликонесущих колес) в виде сигналов, пропорциональных линейным скоростям по двум осям в горизонтальной плоскости.

Моделирование процессов в адаптивной системе терминального управления. Исследование синтезированной системы выполнено методом моделирования с использованием среды визуального моделирования Simulink, входящей в состав пакета MATLAB. Структурная схема моделирования (S-модель) процессов управления КП Robotino для канала управления координатой $x(t)$ изображена на рисунке 1.

Схема моделирования, изображенная на рисунке 1, содержит 4 функциональных блока:

- блок формирования назначенной траектории (Генератор траектории);
- блок формирования управляющих воздействий (Регулятор);
- блок формирования сигналов обратной связи (Информационный канал);
- блок, моделирующий объект управления, (КП Robotino).

Моделирование управляемого движения КП из начального положения в конечное (терминальное) проводилось при различных начальных условиях, а также при действии координатных детерминированных возмущений. Траектория движения КП при действии возмущения в момент времени $t = 4$ с на координату $x(t)$ изображена на рисунке 2, а переходный процесс по координате $x(t)$ – на рисунке 3.

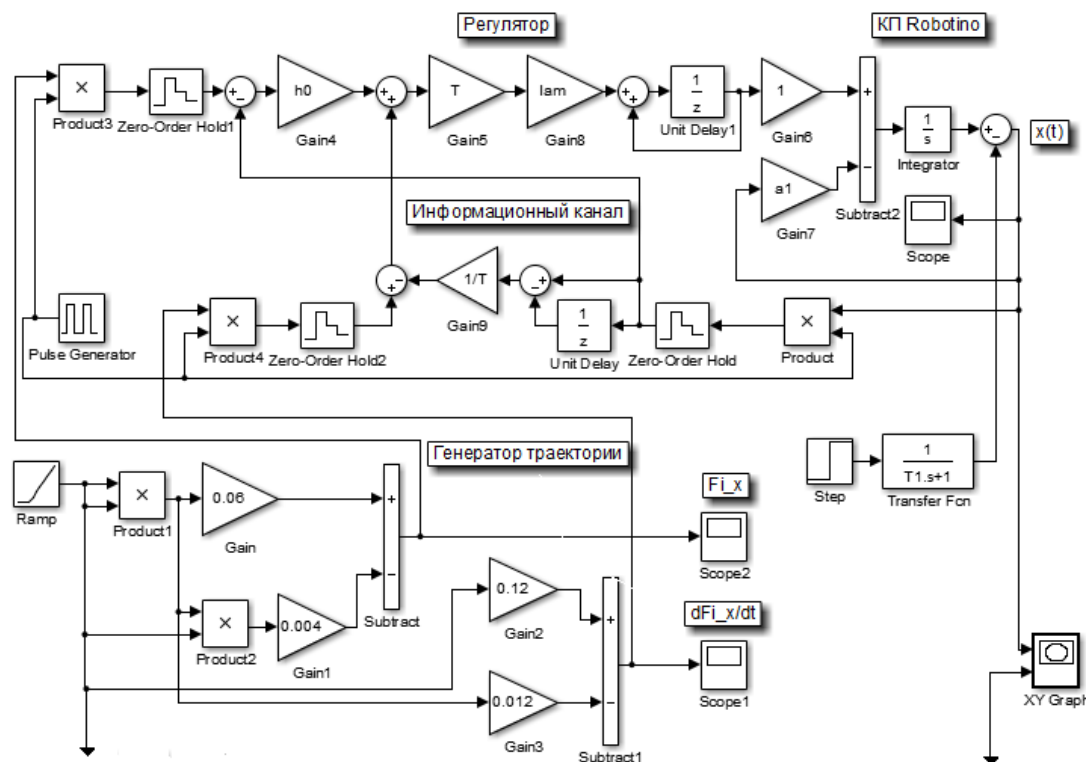


Рисунок 1 – S-модель адаптивной системы терминального управления КП Robotino для одного канала управления по координате $x(t)$

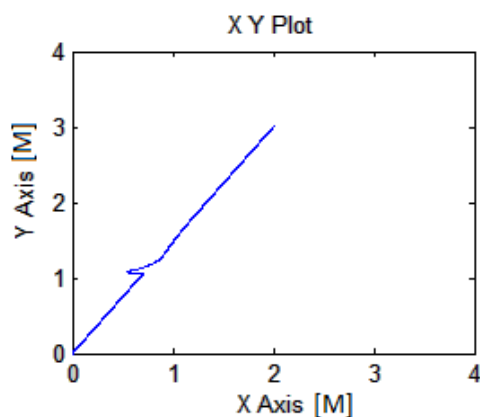


Рисунок 2 – Траектория движения КП при действии возмущения в момент времени $t = 4c$ на координату $x(t)$

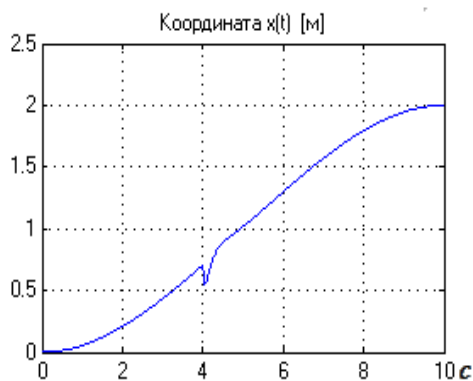


Рисунок 3 – Переходный процесс по координате $x(t)$

Программное обеспечение для терминального управления КП. Системное программное обеспечение представлено операционной системой бортового компьютера (PC 104) колесного робота Robotino, в качестве которой используется операционная система семейства Linux в виде ее дистрибутива Robotino Linux rev.2 (как доработанного варианта ОС Ubuntu Linux 9.04) с расширениями реального времени и дополненными компонентами библиотеки Robotino API. Прикладное программное обеспечение представлено разработанной управляющей программой ProgramMove, схема алгоритма которой изображена на рисунке 4.

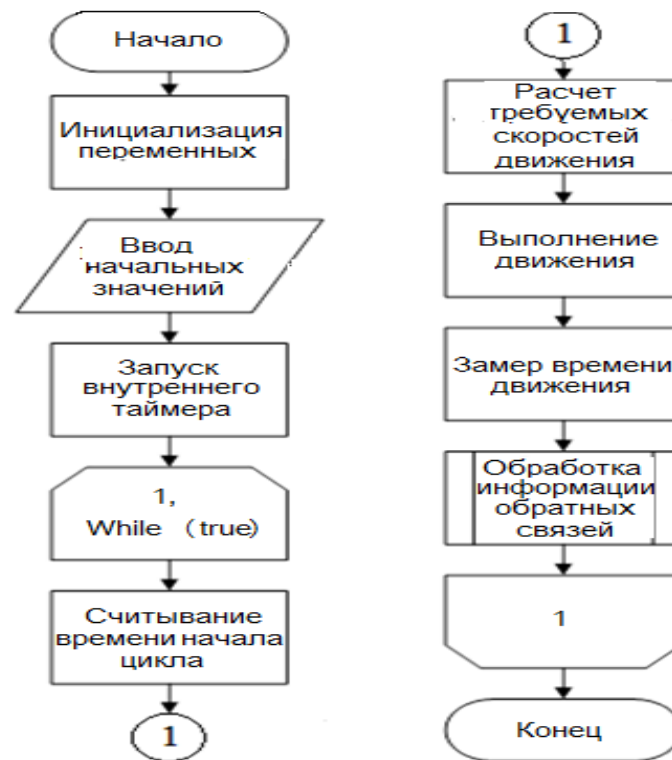


Рисунок 4 – Схема алгоритма управляющей программы ProgramMove

Управляющая программа ProgramMove предназначена для исполнения в консольном окружении системы Linux с установленным Robotino API. Такой средой может являться как непосредственно платформа Robotino, так и (в отладочных целях) установка Ubuntu Linux 9.04 с компонентами Robotino API на x86-совместимом персональном компьютере.

После запуска и инициализации переменных программа реализует заложенный алгоритм по следованию траектории. Для этого в дискретные моменты времени, разделенные периодом T , программа получает местоположение КП при помощи модуля Odometry, объединенного с гироскопическим датчиком в измерительную систему, сравнивает результаты измерений с требуемым местоположением центра масс КП на траектории, выполняет вычисление локального критерия и в соответствии с найденным его значением подает команды управления в виде требуемых скоростей на электропривод исполнительных устройств (роликонесящих колес) платформы. Движение робота выполняется при вызове встроенного в библиотеку Robotino API метода $setVelocity(V_x, V_y, V_\phi)$ объекта класса OmniDrive. Время выполнения движения устанавливается при вызове метода $waitForUpdate(T)$ объекта класса Com. При этом отладочные данные могут выводиться на терминал. Процесс продолжается до тех пор, пока не будет достигнута конечная точка траектории, после чего программа выгружается из памяти.

Заключение. Результаты выполненных исследований свидетельствуют, что применение методологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением позволяет получить компактную по объему и простую по структуре программу для бортового компьютера колесного робота, реализующую в реальном времени адаптивный закон терминального управления движением по назначенной траектории.

Адаптивные свойства спроектированной системы проявляются в виде ее малой чувствительности к изменениям характеристик подстилающей поверхности, определяющих значения коэффициентов трения в уравнении (1).

Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении интеграции алгоритмов решения логистических задач с терминальным управлением в рамках единой технологической задачи, связанной с транспортными операциями в сборочном цехе.

Библиографический список использованной литературы

1. Campion G., Chung W. Wheeled robots // Springer Handbook of Robotics. Eds B. Siciliano, O. Khatib. 2008. P. 391 – 410.
2. Краснодубец Л.А. Управление движением колёсной платформы с тремя степенями свободы / Л.А. Краснодубец, Е.Ф. Морозова // Междунар. науч.-техн. журнал. Информационные технологии и компьютерная инженерия, №2. – Винница: Изд-во ВинНТУ, 2010. – С. 14 – 19.
3. И. В. Мирошник, А. Н. Шалаев Управление тракторным движением автономных роботов // 2001.С.243 – 248.
4. Мартыненко Ю.Г., Формальский А.М. О движении мобильного робота с роликонесущими колёсами // Изв. РАН. ТиСУ. 2007. №6. С. 142 – 149.
5. Крутько П.Д. Новые технологии аналитического проектирования алгоритмического обеспечения систем управления движением / П.Д. Крутько // Управление, автоматизация и окружающая среда: Материалы междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 8-13 сентября 2008. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008.

Krasnodubets L.A., Dmitrishin A.A. Terminal control of wheel robot "Robotino".

The law of terminal adaptive control by the wheel robot, constructed on the basis of the decision of the task of tracking of the assigned trajectory with demanded time of achievement of the assigned point for planes is offered. It is shown that for synthesis of parameters of an appropriate digital regulator it is possible to use simple model of object of control with unknown parameter. The program implementing the offered law of control on the on-board computer in a mode of real time under control of operating system Linux is developed.

Key words: terminal control, the adaptive properties, the control law, synthesis, modeling, the software, the wheel robot.

УДК 004.4: 004.94

Д.Ю. Воронин, канд. техн. наук

В.И. Шевченко, канд. техн. наук

М.С. Кобылянская

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, Россия, 299053

E-mail: dima@voronins.com

МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ ДИСПЕТЧЕРСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ КРИТИЧЕСКОМ ИНФРАСТРУКТУРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ БИБЛИОТЕКИ GRID-LIBRARY¹⁴

Предложена методика принятия диспетчерских решений при критическом инфраструктурном взаимодействии распределенных вычислительных систем в условиях неопределенности. Рассмотрены основные аспекты концепции, ориентированные на создание единой универсальной среды интегрированного управления сетевыми проектами при использовании имитационной библиотеки Grid-library.

Ключевые слова: критическое инфраструктурное взаимодействие, поддержка принятия решения, сетевой проект, Grid, диспетчеризация, имитационное моделирование.

Известно, что в настоящее время сфера применения распределенных вычислений стремительно расширяется. Связано это в том числе и с широчайшими возможностями, предоставляемыми рядовым и корпоративным пользователям посредством технологии Грид. Таким образом, задача синтеза инструментальных средств поддержки принятия диспетчерских решений в Грид-системах, безусловно, является актуальной [1 – 3]. Дополнительную сложность при принятии решений в данной предметной области формируют как директивные требования к оперативному управлению, так и существенный дефицит априорной информации о взаимосвязи характеристик огромного числа используемых компонентов: подсистем, встраиваемых модулей, как автоматических, так и автоматизированных – основанных на процессах поддержки принятия решений посредством диалоговых взаимодействий с ЛПР.

¹⁴ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-41-01522).