

УДК 621.865.8

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С МЕХАТРОННЫМ ГИБРИДНЫМ ПРИВОДОМ

©2012 Ю. В. Илюхин, А. В. Татаринцева

ФГБОУ ВПО Московский государственный технологический университет
«СТАНКИН»

Рассмотрено математическое описание мобильных роботов с мехатронными гибридными приводами и изложены основные решения по организации управления роботами рассматриваемого класса.

Мобильный робот, мехатронный гибридный привод, мехатронный силовой агрегат, математическая модель, моментный электропривод, двигатель внутреннего сгорания.

Мобильные роботы находят всё более широкое применение в различных сферах деятельности человека [1]. Они должны обладать высокими динамическими свойствами и способностью автономно функционировать в сложных меняющихся условиях и перемещаться на значительные расстояния при экономном расходовании ограниченных ресурсов. Анализ показал, что удовлетворить таким требованиям могут мобильные роботы, оснащённые мехатронными гибридными приводами (МГП), сочетающими в себе преимущества двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и моментного электропривода (МЭП). МГП представляет собой сложную управляемую динамическую систему, в которой ДВС, обладающий большой мощностью, обеспечивает необходимый ресурс хода робота, а МЭП позволяет улучшить динамику робота, создавая дополнительный момент, и энергетические показатели МГП, пополняя заряд аккумулятора в режимах рекуперации энергии.

Для успешного решения задач управления роботами с МГП должны быть сформированы математическая модель такого робота и стратегии управления, на основании которых могут быть получены алгоритмы эффективного компьютерного управления роботами с учётом их функциональных возможностей и особенностей применения.

Структура и математическая модель мобильного робота с мехатронным гибридным приводом

Рассматривается мобильный робот, оснащённый МГП и имеющий структуру, изображённую на рис.1 и сформированную на основе идей построения мехатронных систем [2-5]. МГП содержит устройство управления, мехатронный силовой агрегат и подвижные части робота. В состав мехатронного силового агрегата входят ДВС, МЭП, два сцепления, управляемая коробка передач, аккумулятор, датчик скорости вращения коленчатого вала ДВС, датчик скорости вращения вала электродвигателя и устройство управления мехатронным силовым агрегатом. МЭП включает в себя бесконтактный двигатель постоянного тока с датчиком положения ротора, транзисторный инвертор, датчики токов и контроллер, реализующий векторное управление, и представляет собой следящую систему, замкнутую по токам в фазных обмотках электродвигателя.

Математическая модель мобильного робота с МГП состоит из моделей ДВС, МЭП, описания подвижной механической части робота и модели его компьютерной управляющей части. Подвижная механическая часть робота описывается системой дифференциальных уравнений

$$\frac{dn}{dt} = m_{\Sigma}^{-1}(F_{ДВ} - F_{СОПР});$$

$$\frac{dx}{dt} = n,$$

где n и x – скорость и перемещение робота, соответственно; $F_{ДВ}$ – сила, создаваемая двигателями МГП; $F_{сопр}$ – сила сопротивления движению; m_{Σ} – эквивалентная масса подвижных частей робота. При этом $F_{ДВ} = (M_{МЭП} + M_{ДВС}n)i_{ГП}i_{КП}R_K^{-1}$,

где $M_{МЭП}$ и $M_{ДВС}$ – моменты, развиваемые МЭП и ДВС, соответственно; R_K – радиус колеса; $i_{ГП}$ и $i_{КП}$ – передаточные числа главной передачи и коробки передач, соответственно; n – параметр, равный 1, если ДВС подключён с помощью сцепления, и равный 0, если ДВС отсоединён с помощью сцепления.

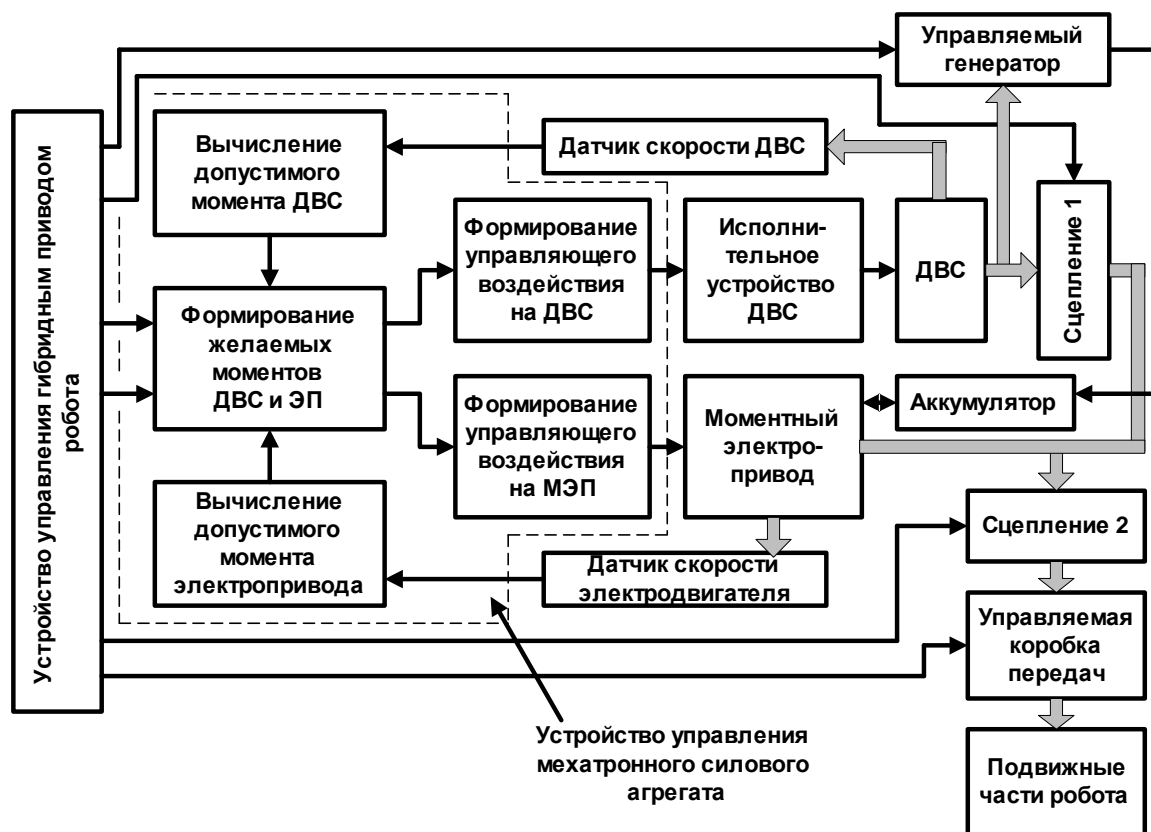


Рис.1. Структура мехатронного гибридного привода

Как правило, МЭП формируется на базе трёхфазных или двухфазных электрических синхронных двигателей с векторным управлением, оснащённых датчиком положения ротора [6]. В частности, момент двухфазного двигателя $M_{МЭП}$ определяется уравнением $M_{МЭП} = -k_m I_1 \sin J + k_m I_2 \cos J$, где I_1 и I_2 – токи в фазных обмотках; k_m – коэффициент момента электродвигателя; J – угол поворота ротора.

Математическая модель ДВС характеризуется нелинейными зависимостями [7], устанавливаемыми в результате анализа экспериментальных данных. В результате применения метода наименьших квадратов получена аналитическая зависимость среднего за один оборот коленчатого вала значения момента $M_{ДВС}$ от управляющего воздействия h и угловой скорости вращения коленчатого вала $\Omega_{ДВС}$: $M_{ДВС} = a(\Omega_{ДВС})[1 - Fe^{-hb(\Omega_{ДВС})}]$, где $a(\Omega_{ДВС}) = A \lg(B\Omega_{ДВС})$

и $b(\Omega_{ДВС}) = C[D\Omega_{ДВС} + E]^{-1}$

– функции, в которых значения параметров A, B, C, D, E, F зависят от типа используемого в работе ДВС. Анализ показал, что эта зависимость может быть использована для описания различных типов ДВС. В результате сравнения данных, получаемых с помощью приведённой формулы, с экспериментальными данными установлено, что относительная погрешность вычислений момента ДВС лежит в диапазоне 5...20% для различных типов двигателей. Это свидетельствует о пригодности полученной зависимости для выполнения анализа свойств МГП.

В модели компьютерного устройства управления описаны процессы формирования управляющих воздействий, подаваемых на регулирующее устройство ДВС и силовой преобразователь МЭП, на основании требуемого суммарного момента M_{Σ} гибридного привода [8,9].

Организация управления мобильным роботом с мехатронным гибридным приводом

Модель компьютерной управляющей части робота состоит из устройства формирования задающих воздействий на МГП, действующего на основе анализа сложившейся ситуации и критериев эффективности функционирования робота, и замкнутой системы регулирования скорости робота с пропорционально-интегральным регулятором. Формирование управляющего воздействия на ДВС U_h производится в соответствии с уравнением:

$$U_h = k_{ИУ}^{-1} h_{Ж},$$

где $k_{ИУ}$ – коэффициент передачи; $h_{Ж}$ – желаемое управляющее воздействие, подаваемое на вход исполнительного устройства ДВС. Расчётное значение h_p воздействия $h_{Ж}$ определяется в функции от желаемого момента ДВС $M_{ДВС.Ж}$ по формуле:

$$h_p = -b^{-1}(\Omega_{ДВС}) \ln \left\{ F^{-1} \left[1 - \frac{M_{ДВС.Ж}}{a(\Omega_{ДВС})} \right] \right\}.$$

Результаты теоретического анализа и компьютерного моделирования показали, что без введения специальных средств коррекции работа МГП в области малых значений частоты вращения вала ДВС неустойчива. Установлено, что для обеспечения устойчивости процессов регулирования ДВС в составе МГП необходимо ограничивать расчётное управляющее воздействие h_p на уровне $h_{ОГР}$, зависящем от скорости коленчатого вала ДВС. Предлагается принять

$$h_{ОГР} = k_{h\Omega} \Omega_{ДВС},$$

где $k_{h\Omega} = 1,45 \cdot 10^{-3}$ с. В этом случае требуемое значение суммарного момента МГП при разгоне робота может быть получено за счёт МЭП, который при необходимости может использоваться и в качестве стартера.

Для получения фактического момента МЭП, соответствующего желаемому электромагнитному моменту $M_{МЭП.Ж}$, необходимо сформировать входные воздействия $U_{ВХ1}$ и $U_{ВХ2}$, подаваемые на входы подсистем регулирования токов в фазных обмотках двигателя, в соответствии с уравнениями:

$$U_{ВХ1} = -M_{МЭП.Ж} k_{ОСТ} k_m^{-1} \sin J_d;$$

$$U_{ВХ2} = M_{МЭП.Ж} k_{ОСТ} k_m^{-1} \cos J_d,$$

где J_d – измеренный датчиком положения ротора угол J поворота ротора. Для увеличения точности формирования момента МЭП в подсистемах регулирования токов целесообразно использовать пропорционально-интегральные регуляторы и настраивать эти подсистемы на технический оптимум.

Особенность алгоритма управления гибридным приводом состоит в рациональном использовании имеющихся ресурсов для реализации требуемого режима работы гибридного привода. Она выражается в определении желаемых значений моментов ДВС и МЭП с учётом их динамически меняющихся возможностей,

зависящих от текущих значений скоростей вращения валов ДВС и электродвигателя МЭП. В блоке формирования желаемых моментов ДВС и МЭП происходит распределение желаемого суммарного движущего момента гибридного привода $M_{\Sigma.Ж}$ на две составляющие $M_{ДВС.Ж}$ и $M_{МЭП.Ж}$ с учётом максимальных реализуемых моментов ДВС $M_{ДВС.доп}$ и МЭП $M_{МЭП.доп}$. Располагаемый момент ДВС определяется по формуле:

$$M_{ДВС.доп} = a(\Omega_{ДВС})[1 - Fe^{-h_{огр}b(\Omega_{ДВС})}].$$

При этом момент $M_{МЭП.доп}$ вычисляется с учётом особенностей механической характеристики электропривода при максимально допустимом напряжении питания обмоток.

Мобильный робот может функционировать в различных режимах работы, перемещаться в общем случае по пересечённой местности, а его МГП должен обладать высокой гибкостью при реализации требуемого момента сил. В соответствии с выбираемой стратегией управления роботом, оснащённым МГП, его система управления может использовать возможности только ДВС или отдельно работающего МЭП, а может реализовать совместную согласованную работу ДВС и МЭП. В последнем случае удаётся добиться улучшения динамики при разгоне или торможении робота, а также повышения энергетических показателей приводной установки [10], что положительно сказывается на длительности работы робота до следующей заправки горючим. При решении поставленной задачи необходимо учитывать интенсивность и протяжённость подъёмов и спусков на запланированном пути робота, силы сопротивления, ограничения на сцепления колёс с дорогой, ограниченную ёмкость аккумулятора и ряд других факторов. В ряде случаев целесообразно выключить ДВС и, отключив его с помощью сцепления, добиться малозумной работы робота за счёт МЭП. Таким образом, алгоритмы управ-

ления, синтезируемые на основе разработанной математической модели и программы компьютерного моделирования, позволяют реализовать различные режимы работы, а также осуществить подробный анализ энергетических характеристик и динамических свойств роботов с гибридными приводами.

В целом устройство управления мобильным роботом представляет собой интеллектуальную систему управления, которая предназначена для решения сложного комплекса различных задач. Важнейшими задачами являются: оптимизация маршрута движения робота с обходом препятствий, оптимизация режимов работы МГП при движении по заданному маршруту по критериям энергоэффективности или времени достижения цели, выбор стратегии движений по известному маршруту, адаптация к действию таких заранее неизвестных факторов, как трение, отклонение от маршрута, ветер и др.

Заключение

Разработанная математическая модель мобильного робота, оснащённого мехатронным гибридным приводом, характеризует его как сложный нелинейный динамический объект. Эта модель может служить основой для исследования энергетических и динамических свойств, выработки стратегии и алгоритмов оптимального управления мобильными роботами в различных условиях их применения.

Библиографический список

1. Ермолов, И.Л. Повышение автономности мобильных роботов как важнейшее направление развития современной робототехники [Текст] / И.Л. Ермолов // Вестник МГТУ «Станкин» — 2010. — №2(10) — С. 121-127.
2. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методы, применение. [Текст] / Ю.В. Подураев — М.: Машиностроение, 2006. — 256 с.

3. Мехатроника [Текст] / Т. Исии, И. Симояма, Х. Иноуэ [и др.] пер. с япон. – М.: Мир, 1988. – 318 с.

4. Подураев, Ю.В. Актуальные проблемы мехатроники [Текст] / Ю.В. Подураев // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – №4 – С. 50-53.

5. Илюхин, Ю.В. Реализация мехатронного подхода при построении систем компьютерного управления комплексов лазерной и плазменной резки [Текст] / Ю.В. Илюхин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – №10 – С. 45-50.

6. Баранов, М.В. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями [Текст] / М.В. Баранов, В.Н. Бродовский, А.В. Зимин, Б.Н. Каржавов - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. – 240 с.

7. Крутов, В.И. Автоматическое регулирование и управление двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.И. Крутов. М.: Машиностроение, 1989. — 416 с.

8. Илюхин, Ю.В. Управление мехатронным гибридным приводом автономного мобильного робота [Текст] / Ю.В.

Илюхин, А.В. Яновская // Труды XXI международной научно-технической конференции экстремальная робототехника. – Санкт-Петербург: Изд-во «Политехника - сервис», 2010. – С.431- 435.

9. Илюхин, Ю.В. Математические модели гибридных приводов мобильных роботов. [Текст] / Ю.В. Илюхин, А.В. Татаринцева // Международный научно-технический форум, посвященный 100-летию ОАО «Кузнецов» и 70-летию СГАУ, Самара, 5-7 сентября 2012 года: Сборник трудов в 3-х томах. Т.2. Международная научно-техническая конференция с участием молодых учёных «Динамика и виброакустика машин». – Самара: Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2012. – С. 240-241.

10. Илюхин, Ю.В. Компьютерное моделирование движений мобильного робота с гибридными приводами [Текст] / Ю.В. Илюхин, А.В. Яновская // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – Москва: Из-во МГТУ им. Баумана. — 2011. – Специальный выпуск «Специальная робототехника и мехатроника» – С. 54-61.

MATHEMATICAL MODEL AND PECULIARITIES OF OPERATING MOBILE ROBOTS WITH HYBRID DRIVES

©2012 Yu. V. Ilyukhin, A. V. Tatarintseva

Federal State-Funded Educational Institution of Higher Vocational Education Moscow
State Technological University «Stankin»

The paper presents a mathematical description of mobile robots with hybrid mechatronic drives. Basic solutions for the organization of operating the robots of the type under consideration are outlined.

Mobile robot, mechatronic hybrid drive, mechatronic power unit, mathematical model, torque electric drive, internal combustion engine.

Информация об авторах

Илюхин Юрий Владимирович, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин». E-mail: ilyv_178@mail.ru. Область научных интересов: мехатронные и робототехнические системы, компьютерное управление, математическое моделирование, электрические и пневматические приводы.

Татаринцева Александра Викторовна, аспирант кафедры робототехники и мехатроники, ФГБОУ ВПО МГТУ «Станкин». E-mail: [alia ta@mail.ru](mailto:alia_ta@mail.ru). Область научных интересов: мехатронные системы, мобильная робототехника, математическое моделирование, компьютерное управление, электрические приводы, системы управления.

Ilyukhin Yury Vladimirovich, associate professor, doctor of technical science, professor of the department of robotics and mechatronics, Moscow State Technological University «Stankin». E-mail: ilyv_178@mail.ru. Area of research: mechatronic and robotic systems, computer control, mathematical modeling, electric and pneumatic drives.

Tatarintseva Alexandra Victorovna, post-graduate student of the department of robotics and mechatronics, Moscow State Technological University «Stankin». E-mail: [alia ta@mail.ru](mailto:alia_ta@mail.ru). Area of research: mechatronic systems, mobile robotics, mathematical modeling, computer control, electric drives, control systems.