

Математическое моделирование нагрузки на приводной двигатель малогабаритного мобильного робота в модуле симуляции движения

БОДРОВ Е.Э., БОДРОВА С.И., ЛЫСЕНКО А.А.

Применение малогабаритных мобильных роботов постоянно расширяется. Это связано с тем, что их конструкции, алгоритмы управления и вычислительные возможности управляющих устройств постоянно совершенствуются, улучшаются материалы изготовления. Мобильные роботы могут применяться в труднодоступных местах, в среде, опасной для человека, и во многих других приложениях. В статье сделан анализ нагрузки, действующей на приводной двигатель малогабаритного мобильного робота, передвигающегося по ровной поверхности. Определены составляющие механической нагрузки на двигатель, а также проанализировано взаимное изменение этих составляющих в зависимости от направления движения робота. Найдено выражение, описывающее перераспределение составляющих нагрузки при движении робота прямо и при повороте. Показано, что математическое описание нагрузки на приводные двигатели робота имеет перекрестные связи по скорости правого и левого колес, для того чтобы учесть это перераспределение нагрузки. Разработанное математическое описание нагрузки может быть использовано при синтезе регуляторов частоты вращения приводных двигателей мобильного робота; для исследования функционирования робота при разработке нового алгоритма управления им или оптимизации уже существующего; для симуляции движения робота при определении его местонахождения и других приложений.

Ключевые слова: *робот, математическая модель, двигатель, микропривод, математическое описание, перекрестные связи, симуляция движения*

Для совершенствования конструкции роботов и снижения стоимости необходимы исследования и применение новых, более прочных и легких материалов, разработка принципиально новых конструкций, оптимизация алгоритмов управления роботами. Оптимизация алгоритма управления роботом или разработка нового алгоритма предполагают исследование функционирования робота на математической модели. При разработке математических моделей особое внимание нужно уделить моделированию внешних условий, в которых находится робот, т.е. моделированию нагрузки на его приводные двигатели.

Разработано множество математических моделей, описывающих электрическую и механическую части электроприводов мобильных роботов и других механизмов [1–9]. В данной работе поставлена задача моделирования механической части электропривода мобильного робота. При разработке математической модели необходимо учесть внешние условия, в которых находится и перемещается робот. В качестве примера был выбран малогабаритный мобильный робот, построенный на основе распространенного и доступного конструктора Lego Mindstorms NXT [1–5].

Моделирование нагрузки на приводной двигатель мобильного робота. Вначале определим, в каких внешних условиях будет перемещаться робот.

Предположим, что по ровной горизонтальной поверхности, имеющей хорошее сцепление с колесами во избежание проскальзывания. Принятые допущения позволяют значительно упростить вывод математических выражений и (при необходимости) наличие неровностей на поверхности учесть отдельно. Предположение о ровной горизонтальной поверхности подходит для многих практических приложений применения мобильных роботов, связанных с объездом препятствий.

Существует множество разновидностей конструкций малогабаритных мобильных роботов. Они могут иметь классическую двухосную четырехколесную базу, трехколесную базу, трехосную базу и др. В данной работе будет рассматриваться робот,

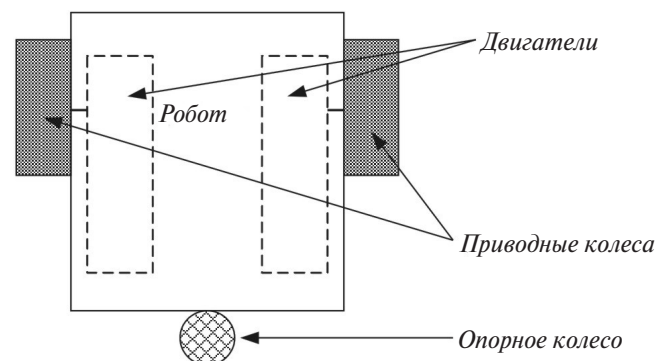


Рис. 1. Конструкция трехколесного мобильного робота

имеющий трехколесную базу, достаточно часто применяемую по причине простой конструкции и несложного алгоритма управления (см. рис. 1).

Робот имеет два приводных колеса и одно опорное. Каждое из приводных колес приводится в движение собственным двигателем постоянного тока. Для конкретизации рассмотрим в качестве приводного двигателя микромощный коллекторный двигатель постоянного тока, устанавливаемый в роботах Lego Mindstorms NXT.

Кинематическая схема системы «двигатель—колесо» приведена на рис. 2. Электромагнитный момент и угловая скорость двигателя через редуктор передаются на его выходной вал, а затем на колесо.

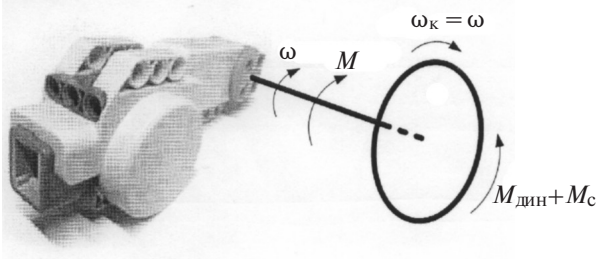


Рис. 2. Упрощенная кинематическая схема системы «двигатель—колесо»

Для упрощения при расчетах предполагается, что ось, соединяющая приводной двигатель с колесом, абсолютно жесткая. Это означает, что угловая скорость вращения колеса ω_k равна угловой скорости выходного вала двигателя ω .

Электрическая и механическая части привода робота для одного из двигателей описываются системой уравнений:

$$U = IR + L \frac{dI}{dt} + E; \quad M - M_c = J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{дин}},$$

где U — напряжение, подаваемое на двигатель; I — ток якоря двигателя; R — полное активное сопротивление цепи якоря; L — индуктивное сопротивление цепи якоря; E — ЭДС, создаваемая магнитным потоком в обмотке якоря; M — электромагнитный момент, развиваемый двигателем; M_c — момент сопротивления со стороны колеса; J — суммарный момент инерции системы «двигатель—колесо»; ω — угловая скорость вращения на выходе редуктора двигателя; $M_{\text{дин}}$ — динамический момент.

В динамическом режиме электромагнитный момент M , развиваемый одним двигателем, уравновешивается моментом статической нагрузки M_c и динамическим моментом $M_{\text{дин}}$:

$$M = M_c + M_{\text{дин}}.$$

Рассмотрим нагрузку, прикладываемую к роботу в целом. Динамический момент $M_{\text{дин.роб}}$,

возникающий в переходном режиме, включает две составляющие: динамический момент, зависящий от массы робота $M_{\text{мас.роб}}$, и два динамических момента, вызванные инерцией каждого из колес $M_{\text{ин.кол}}$:

$$M_{\text{дин.роб}} = M_{\text{мас.роб}} + 2M_{\text{ин.кол}}.$$

Момент статического сопротивления $M_{\text{с.роб}}$ робота, присутствующий в любом режиме, включает две составляющие: два момента сопротивления, определяемые трением во всех вращающихся элементах каждого из двигателей $M_{\text{тр}}$, и момент сопротивления, вызванный трением заднего опорного колеса об опору $M_{\text{тр.оп}}$:

$$M_{\text{с.роб}} = 2M_{\text{тр}} + M_{\text{тр.оп}}.$$

Динамический момент, зависящий от массы робота $M_{\text{мас.роб}}$, можно найти из второго закона Ньютона для поступательного движения как произведение массы робота m на его ускорение dV_p/dt , где V_p — линейная скорость движения робота.

Если робот выполняет задачу перемещения различных объектов, то в случае захвата объекта общая масса робота увеличится на массу объекта. В этом случае вместо массы робота используется сумма массы робота m и захваченного объекта $m_{\text{об}}$.

Для того чтобы уравнение динамического момента, зависящего от массы робота $M_{\text{мас.роб}}$, можно было использовать для исследования и синтеза регуляторов, необходимо перейти от линейной скорости перемещения робота V_p к угловой скорости вращения приводного колеса ω рассматриваемого двигателя (левого или правого). Для этого рассмотрим два случая, приведенных на рис. 3. На рис. 3,а показан случай движения робота прямо с линейной скоростью V_p . При этом линейная скорость перемещения левого колеса $V_{\text{л}}$ равна линейной скорости правого колеса $V_{\text{п}}$ и равна V . В этом случае линейная скорость передвижения робота максимальна и равна $V_p = V$.

На рис. 3,б показан случай поворота робота вокруг геометрического центра правого колеса (вокруг точки O). При этом предполагается, что левое колесо робота имеет линейную скорость $V_{\text{л}} = V$, а скорость правого колеса равна нулю. В этом случае центр тяжести робота (точка P) будет перемещаться с линейной скоростью V_p , меньшей, чем линейная скорость перемещения левого колеса. При таком типе поворота скорость V_p будет иметь наименьшее значение.

Если скорость правого колеса будет больше нуля, но меньше скорости левого колеса, то линейная скорость робота примет значение от $(l_p/l_k)V$ до V . Основываясь на геометрических соотношениях, показанных на рис. 3, было выведено общее

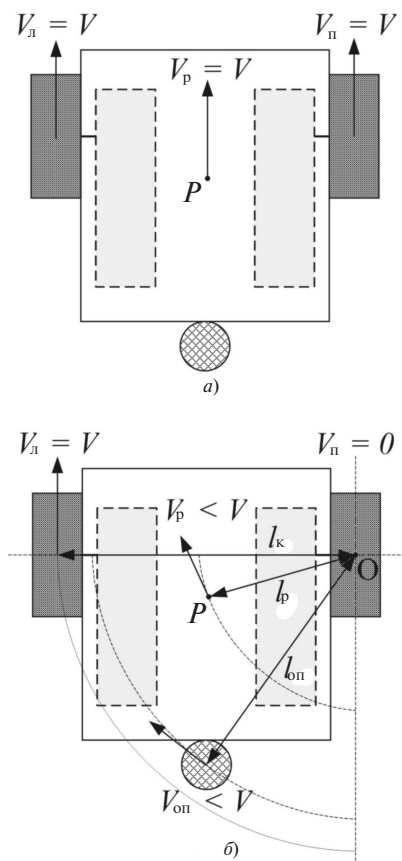


Рис. 3. Определение значений линейной скорости перемещения робота V_p и опорного колеса $V_{оп}$ при движении прямо (а) и при повороте направо (б)

выражение для линейной скорости перемещения центра масс робота через угловые скорости каждого из приводных колес. Это позволяет рассчитать динамический момент, определяемый массой робота в общем случае вместе с захваченным объектом, по выражению:

$$M_{\text{мас.роб+об}} = (m + m_{\text{об}}) R_k \frac{d}{dt} \left(\frac{l_p}{l_k} \omega_{\text{max}} + \left(1 - \frac{l_p}{l_k} \right) \omega_{\text{min}} \right),$$

где R_k – радиус приводного колеса; l_p – расстояние от геометрического центра приводного колеса до центра масс робота; l_k – расстояние между геометрическими центрами приводных колес; ω_{max} – угловая скорость колеса, которое при повороте робота вращается быстрее; ω_{min} – угловая скорость второго колеса, вращающегося медленнее.

При движении робота прямо угловые скорости вращения обоих приводных колес равны между собой: $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{min}} = \omega$, и момент $M_{\text{мас.роб+об}}$ будет иметь максимальное значение.

Динамический момент, вызванный инерцией каждого из колес,

$$M_{\text{ин.кол}} = J_k \frac{d\omega}{dt} = \frac{m_k R_k^2}{2} \frac{d\omega}{dt},$$

где J_k – момент инерции приводного колеса; m_k – масса приводного колеса.

Момент сопротивления, определяемый трением во всех вращающихся элементах двигателя $M_{\text{тр}}$, можно найти экспериментально. Для расчета $M_{\text{тр}}$ необходимо измерить ток якоря двигателя при вращении приводного колеса, когда робот движется с различными скоростями, затем умножить полученные значения тока нагрузки на коэффициент электромеханического преобразования C двигателя. Результаты аппроксимации экспериментального измерения сухого и вязкого трения системы «электродвигатель–колесо» робота Lego Mindstorms NXT, подробно описанного в [1], приведены на рис. 4.

Обычно вязкое трение намного меньше сухого и им можно пренебречь. Однако согласно [1] при максимальной скорости движения робота рассматриваемой конструкции Lego Mindstorms NXT вязкое трение примерно равно по значению сухому. Поэтому в данном случае вязкое трение обязательно нужно учитывать, в [1] приведен расчет коэффициентов сухого и вязкого трения.

Момент сопротивления, вызванный трением в системе «электродвигатель–колесо»,

$$M_{\text{тр}} = B_{\text{дв}} \omega + A_{\text{дв}},$$

где $B_{\text{дв}}$ – коэффициент вязкого трения системы «электродвигатель–колесо»; $A_{\text{дв}}$ – сухое трение системы «электродвигатель–колесо».

Момент сопротивления, вызванный трением заднего опорного колеса $M_{\text{тр.оп}}$, можно найти также экспериментально, но не на холостом ходу, а под нагрузкой. Для этого необходимо измерить ток якоря одного из приводных двигателей при движении робота прямо с различными установившимися значениями скоростей от минимальной до максимальной. Ток якоря необходимо измерять только

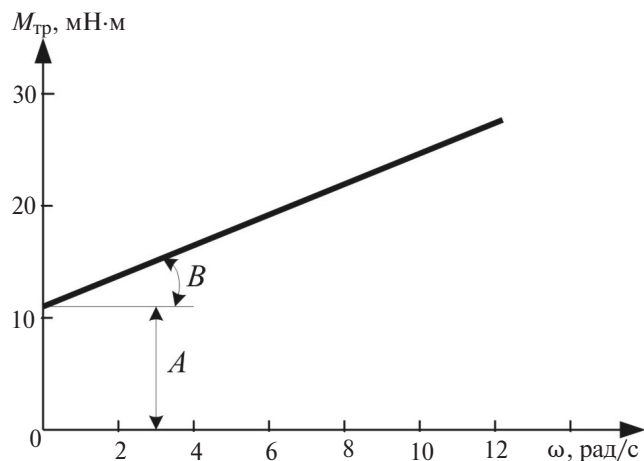


Рис. 4. Результаты аппроксимации экспериментального измерения сухого и вязкого трения системы «электродвигатель–колесо» робота Lego Mindstorms NXT

после завершения переходных процессов (после того как робот разогнался до заданного значения скорости), чтобы получить значение тока якоря, вызванное статической нагрузкой. После измерений нужно умножить полученное значение тока якоря на коэффициент электромеханического преобразования C двигателя, что даст в итоге значение момента статического сопротивления $M_{с.роб}$ робота. Зависимость $M_{с.роб}$ от угловой скорости вращения приводных колес ω будет иметь вид, подобный диаграмме экспериментального измерения сухого и вязкого трения системы «электродвигатель–колесо» робота Lego Mindstorms NXT (см. рис. 4), но будет располагаться выше, поскольку график $M_{с.роб}(\omega)$ состоит из двух зависимостей $M_{тр}(\omega)$ и одной $M_{тр.оп}(\omega)$. Вычитая из графика $M_{с.роб}(\omega)$ два графика $M_{тр}(\omega)$, можно построить $M_{тр.оп}(\omega)$.

Зависимость момента трения опоры от скорости, определенная экспериментально, описывается уравнением прямой:

$$M_{тр.оп} = B_{оп} \omega_{оп} + A_{оп},$$

где $B_{оп}$ – коэффициент вязкого трения опоры; $A_{оп}$ – сухое трение опоры; $\omega_{оп}$ – угловая скорость вращения опорного колеса.

Целесообразно от угловой скорости опорного колеса $\omega_{оп}$ перейти к линейной скорости его перемещения $V_{оп}$. Аналогично определению линейной скорости перемещения робота на рис. 3 проиллюстрировано также определение линейной скорости движения $V_{оп}$ опорного колеса через линейные скорости приводных колес $V_{л}$ и $V_{п}$. На рис. 3,а приведен случай прямого движения. При этом линейная скорость перемещения опорного колеса $V_{оп}$ равна линейной скорости приводных колес V . На рис. 3,б приведен случай поворота робота направо вокруг геометрического центра правого колеса (точка О), так как его скорость равна нулю. Как и в случае с определением линейной скорости перемещения самого робота, линейную скорость приводного колеса можно найти из аналогичного уравнения. Это позволяет рассчитать момент сопротивления, вызванный трением заднего опорного колеса:

$$M_{тр.оп} = B_{оп} \frac{R_{к}}{R_{оп}} \left(\frac{l_{оп}}{l_{к}} \omega_{max} + \left(1 - \frac{l_{оп}}{l_{к}} \right) \omega_{min} \right) + A_{оп},$$

где $l_{оп}$ – расстояние между геометрическими центрами опорного и приводного колес; $R_{оп}$ – радиус опорного колеса. Поскольку робот имеет симметричную конструкцию, расстояние $l_{оп}$ одинаково относительно правого и левого колес.

Рассмотрим нагрузку на один приводной двигатель робота. Динамический момент, вызванный инерцией колеса $M_{ин.кол}$, и момент сопротивле-

ния, определяемый трением во всех вращающихся элементах одного двигателя $M_{тр}$, одинаковы для правого и левого колес. Динамический момент, зависящий от массы робота $M_{мас.роб}$, и момент сопротивления, вызванный трением заднего опорного колеса об опору $M_{тр.оп}$, распределяются поровну (по половине значения соответствующего момента для всего робота) между правым и левым приводными колесами только при движении робота по прямой. При его повороте одно и то же значение динамического момента или момента сопротивления распределяется между приводными колесами неравномерно. Большее значение момента сопротивления будет приложено к колесу, имеющему большую скорость, а меньшее – к колесу, имеющему меньшую скорость.

Такое распределение нагрузки со стороны опорного колеса между приводными колесами можно учесть, введя соответствующий коэффициент. Таким образом, нагрузка на один приводной двигатель рассчитывается по уравнению:

$$\begin{aligned} M_{нагр} &= \frac{\omega}{\omega + \omega'} (M_{мас.роб+об} + M_{тр.оп}) + M_{ин.кол} + M_{тр} = \\ &= \frac{\omega}{\omega + \omega'} \left((m + m_{об}) R_{к} \frac{d}{dt} \left(\frac{l_{п}}{l_{к}} \omega_{max} + \left(1 - \frac{l_{п}}{l_{к}} \right) \omega_{min} \right) + \right. \\ &\quad \left. + B_{оп} \frac{R_{к}}{R_{оп}} \left(\frac{l_{оп}}{l_{к}} \omega_{max} + \left(1 - \frac{l_{оп}}{l_{к}} \right) \omega_{min} \right) + A_{оп} \right) + \\ &\quad + \frac{m_{к} R_{к}^2}{2} \frac{d\omega}{dt} + B_{дв} \omega + A_{дв}, \end{aligned}$$

где ω – угловая скорость вращения рассматриваемого колеса (левого или правого); ω' – угловая скорость вращения второго колеса независимо от того, левое оно или правое.

Из приведенного уравнения видно, что математическая модель робота имеет перекрестные связи по скорости вращения левого и правого приводных колес.

Разработанная модель механической части электропривода мобильного робота в совокупности с математической моделью электрической части двигателя, подробно описанной в [10], может быть использована для исследования функционирования робота при разработке нового алгоритма управления им или оптимизации уже существующего; для симуляции движения робота при определении его местонахождения; синтеза регуляторов, управляющих электродвигателями приводных колес, других приложений.

На рис. 5 приведена упрощенная структурная схема системы управления мобильным роботом при симуляции движения робота для определения

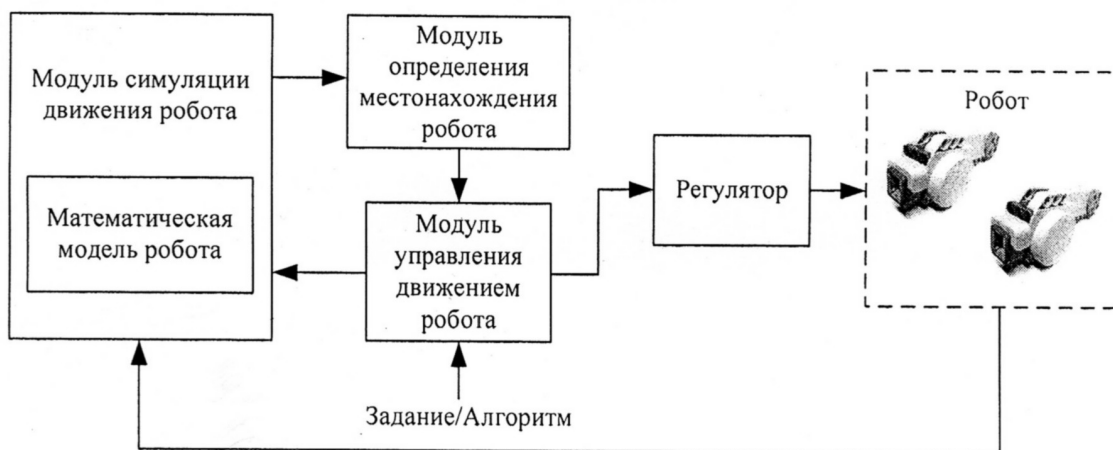


Рис. 5. Структурная схема системы симуляции движения робота для определения его местонахождения

его местонахождения. На схеме не показан интерфейс с пользователем или оператором, который может управлять роботом.

Модуль симуляции движения робота на основе разработанной математической модели механической части мобильного робота и информации о частоте вращения приводных колес робота, полученной посредством обратной связи от него, моделирует перемещение робота в пространстве. Основываясь на симуляции движения робота, модуль определения местонахождения рассчитывает текущее положение робота в пространстве относительно заданной точки отсчета. Используя рассчитанное текущее положение робота в пространстве, модуль управления движением робота определяет направление, скорость и необходимость дальнейшего его движения в соответствии с алгоритмом его функционирования, т.е. с выполняемой им задачей, и передает через регулятор управляющее воздействие на приводные двигатели робота. Кроме того, модуль управления движением робота передает информацию о движении и действиях робота обратно в модуль симуляции движения. Это необходимо, если робот выполняет задачу, связанную с перемещением объектов. В случае, когда он захватывает предмет, его масса увеличивается на массу этого предмета, что необходимо учитывать при симуляции движения робота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dalsager H.W., Esbensen T., Jensen B.T. Camera Controlled Robot. – Report of the group 508 on 5th semester «Real time systems with feedback», Department of Electronic Systems, Aalborg University, 2006 [Электрон. ресурс] <http://www.zcuba.dk/reports/06gr508.pdf>. (Дата обращения 18.08.2018).
2. Valera A. Platform for the Development of Mechatronic Practical Works Based on LEGO Mindstorms NXT Robots. – 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8–10, 2009.
3. Бобицов А.А., Капитанюк Ю.А., Капитонов А.А., Колюбин С.А., Пыркин А.А., Чепинский С.А., Шаветов С.В. Технология LEGO Mindstorms NXT в обучении студентов основам адаптив-

ного управления. – Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2011, № 1(71), с. 103–108.

4. Казагачев В.Н., Кудайбергенов С.Б., Крымгалиев М.У. Обучение основам робототехники с использованием LEGO Mindstorms NXT. М.: ACADEMY, 2016, № 3(6), с. 36–38.
5. Левин К.В., Черепанов И.Е. Реализация робота LEGO Mindstorms NXT, имеющего возможность дистанционного управления. – Электронные средства и системы управления, 2013, № 2, с. 129–130.
6. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985, 560 с.
7. Розин П.А., Акимов А.В., Кудинова Л.А. Анализ методов расчета и моделирования электродвигателей постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. – Изв. Московского гос. техн. ун-та (МАМИ), 2013, т. 1, № 2(16), с. 133–138.
8. Коваленко И.М. Компьютерное моделирование электрического привода с использованием SPICE модели шагового двигателя. – Электропитание, 2015, № 1, с. 56–61.
9. Шрейнер Р.Т., Емельянов А.А., Клишин А.В., Медведев А.В. Моделирование моментов нагрузки электродвигателей в MATLAB. – Молодой ученый, 2010, т.1, № 8, с. 6–12 [Электрон. ресурс] <https://moluch.ru/archive/19/1902/> (Дата обращения: 14.05.2018).
10. Бодров Е.Э., Бодрова С.И. Математическое описание приводного двигателя малогабаритного мобильного робота. – Междунар. сб. науч. трудов. «Энергетические и электротехнические системы»/Под ред. С.И. Лукьянова, Е.Г. Нешпоренко. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017, вып. 4, 356 с.

[29.05.2018]

А в т о р ы: Бодров Евгений Эдуардович окончил Магнитогорский государственный технический университет (МГТУ) им. Г.И. Носова в 2005 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Модернизация многосвязной системы электропривода непрерывного листового стана холодной прокатки». Доцент кафедры электроники и микроэлектроники МГТУ им. Г.И. Носова.

Бодрова Снежана Ивановна окончила Магнитогорский государственный университет в 2008 г. Обучается в магистратуре МГТУ им. Г.И. Носова по направлению «Электроника и нанoeлектроника».

Лысенко Анастасия Александровна обучается в бакалавриате МГТУ им. Г.И. Носова по направлению «Электроника и нанoeлектроника».

Mathematical Simulation of the Load Applied to the Driving Motor of a Compact Mobile Robot in the Motion Simulation Module

BODROV Yevgeny E. (*The Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia*) – Associate Professor of the Department of Electronics and Microelectronics, the leading engineer of the department of innovative developments of CJSC«CONSOM SKS».

BODROVA Snezhana I. – Graduate student at the Nosov Magnitogorsk State Technical University in specialty of «Electronic and nanoelectronic»

LYSENKO Anastasiya A. – Undergraduate student at the Nosov Magnitogorsk State Technical University in specialty of «Electronic and nanoelectronic»

The application fields of compact mobile robots are constantly widened. This is because their designs, control algorithms, and the computing capacities of their controlling devices are constantly improved, and so are the materials used to manufacture them. Mobile robots can be used in hard-to-reach places, in a medium hazardous for a human, and in many other applications. The article presents an analysis of the load applied to the driving motor of a compact mobile robot moving over an even surface. The mechanical load components acting on the motor are determined, and the mutual change of these components as a function of the robot motion direction is analyzed. An expression describing the redistribution of load components when the robot moves in a straight direction and when it makes a turn is found. It is shown that the mathematical description of the load applied to the rotor driving motors contains cross links in terms of the right- and left-hand wheel speeds for taking into account this redistribution of load. The developed mathematical description of load can be used in synthesizing the rotation frequency controllers of the mobile robot driving motors, for investigating the robot performance characteristics in elaborating a new algorithm of its control or in optimizing the existing one, for simulating the robot motion in determining its location, and for other applications.

Key words: robot, mathematical model, motor, microdrive, mathematical description, cross links, motion simulation

REFERENCES

1. Dalsager H.W., Esbensen T., Jensen B.T. Camera Controlled Robot. – Report of the group 508 on 5th semester «Real time systems with feedback», Department of Electronic Systems, Aalborg University, 2006 [Electron. Resurs] <http://www.zcuba.dk/reports/06gr508.pdf>. (Data of apple 18.08.2018).
2. Valera A. Platform for the Development of Mechatronic Practical Works Based on LEGO Mindstorms NXT Robots. – 18th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2009 IEEE Multi-conference on Systems and Control Saint Petersburg, Russia, July 8–10, 2009.
3. Bobtsov A.A., Kapitanov Yu.A., Kapitonov A.A., Kolyubin S.A., Pyrkin A.A., Chepinskiy S.A., Shavetov S.V. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* – in Russ. (*Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*), 2011, No. 1(71), pp. 103–108.
4. Kazagachev V.N., Kudaibergenov S.B., Krymgaliyev M.U. *ACADEMY* – in Russ. (*ACADEMY*), 2016, No. 3(6), pp. 36–38.
5. Levin K.V., Cherepanov I.Ye. *Elektronnye sredstva i sistemy upravleniya* – in Russ. (*Electronic means and control systems*), 2013, No. 2, pp. 129–130.
6. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov* (Theory of electric drive. Textbook for high schools). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 560 p.
7. Rozin P.A., Akimov A.V., Kudinova L.A. *Izv. Moskovskogo gos. tekhn. universiteta (MAMI)* – in Russ. (*News of the Moscow State Technical University (MAMI)*), 2013, vol.1, No. 2(16), pp. 133–138.
8. Kovalenko I.M. *Elektropitaniye* – in Russ. (*Power supply*), 2015, No. 1, pp. 56–61.
9. Shreiner R.T., Yemel'yanov A.A., Klishin A.V., Medvedev A.V. *Molodoi uchenyi* – in Russ. (*Young Scientist*), 2010, vol.1, No. 8, pp. 6–12 [Electron. resurs] <https://moluch.ru/archive/19/1902/> (Data of apple 14.05.2018).
10. Bodrov Ye.E., Bodrova S.I. *Matematicheskoe opisaniye privodnogo dvigatelya malogabaritnogo mobil'nogo robota. Mezhdunarod. sb. nauchn. trudov «Energeticheskiye i elektrotekhnicheskiye sistemy»* (Mathematical description of the drive motor of a small mobile robot. Intern. Sci. works «Power and electrotechnical systems»/Edit. by S.I. Luk'yanov, Ye.G. Neshporenko. Publ. of the Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2017, iss. 4, 356 p.

[29.05.2018]