

**Б.А. Татаринovich, В.О. Котляров**

## **КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПОДСИСТЕМ ОРИЕНТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГОРНОМ ДЕЛЕ**

Автономные колесные роботы способны в автоматическом режиме выполнять работы по обследованию территории. Подсистемы таких роботов тесно взаимосвязаны. Анализ характеристик трансмиссий разработанных роботов показал, что в них могут возникать колебательные процессы, обусловленные проскальзыванием колес и упругостью механических передач. Эти колебательные процессы снижают точность навигации и управления движением, надежность, срок службы и ухудшают другие характеристики робота. Для демпфирования колебаний и снижения проскальзывания в электроприводах колес были применены модальные регуляторы с наблюдателями состояния. Их синтез базируется на математической модели двухмассовой электромеханической системы. Такая модель может расширяться моделью сил сопротивления движению, что позволяет использовать оценку сопротивления в системе навигации для учета характеристик поверхности перемещения. Сложность программной реализации наблюдателя с расширенной моделью относительно мала. За счет упрощения алгоритмов визуального ориентирования методами фотограмметрии при одновременном совершенствовании электроприводов колес робота достигается повышение точности систем навигации и управления движением, снижается вычислительная нагрузка.

Ключевые слова: мобильный робот, система навигации, управление движением, проскальзывание колес, электропривод, демпфирование колебаний, наблюдатель.

**В** горном деле при геологоразведочных, топографических, картографических работах расширяется область применения мобильных автономных роботов. В частности, широкое применение находят колесные роботы. При строительстве

объектов и обустройстве территорий такой робот способен в автоматическом режиме провести рутинную работу по обследованию территории с целью замеров экологических параметров с плотностью точек опробования зависящей от производственной задачи и площади участка.

Траектория движения робота организуется по заданной схеме, простейшей из которых является челночное движение вдоль продольной линии обследуемой территории с заданным интервалом остановок для замера параметров. При необходимости выполняется объезд обнаруженных препятствий по заданным алгоритмам.

Конструкция робота и алгоритмы его работы существенно зависят от назначения колесного робота, например, от характера обследуемого объекта и сложности поверхности передвижения, от площади обследуемой территории, требуемой грузоподъемности и скорости движения, заданной точности позиционирования, устанавливаемого на роботе оборудования и многого другого. Для роботов, применяемых в горном деле, характерна сложность рельефа поверхности перемещения робот, варьирование других характеристик условий применения в широких диапазонах. Все это обуславливает разнообразие применяемых в роботах технических решений, требует их рационального выбора в каждом конкретном случае.

Анализ процесса проектирования колесных роботов выявил, что в ходе их проектирования приходится решать значительное число взаимосвязанных технических проблем, среди которых ориентирование в окружающем пространстве, увеличение времени автономной работы, снижение массогабаритных и стоимостных показателей. Тесная взаимосвязь данных проблем осложняет выбор технических решений и обусловлена взаимовлиянием подсистем мобильных роботов и их характеристик. Так, подсистема навигации и ориентирования в пространстве может тесно взаимодействовать с системами управления электроприводов колес. Эти электроприводы не только определяют точность отработки заданных направления и скорости движения робота, но и предоставляют его подсистеме ориентирования информацию от датчиков, например, скорости вращения и угла поворота, установленных на колесах или валах электродвигателей. Предоставляться также могут результаты косвенных измерений. Например, по току и скорости двигателя или углу поворота колеса может вычисляться скорость вращения колеса и его ускорение, если установка таких датчиков нецелесооб-

разна. Зачастую собственные датчики подсистемы навигации робота, такие как лазерные дальнометры, устройства системы GPS и видеокамеры, используются для глобального ориентировочного позиционирования и уменьшения накопившейся существенной ошибки позиционирования, а датчики системы электропривода, такие как установленные на валах колес энкодеры, применяются для локального позиционирования с сантиметровой точностью. Грамотное сочетание этих средств может позволить обеспечить высокую точность работы подсистемы навигации и при этом сбалансировать вычислительную нагрузку процессора робота за счет исключения чрезмерно сложных алгоритмов обработки информации, выполняемых в рамках только одной подсистемы.

Однако информация, поступающая от датчиков электропривода, часто служит лишь косвенной оценкой величин, необходимых для ориентирования. Точность такой оценки зависит от процессов в электромеханических системах робота, от режима работы электропривода, технического состояния механической передачи, качества ее изготовления и износа. Например, колеса робота могут проскальзывать, и тогда датчик скорости колеса не дает точной информации о скорости движения робота.

Для учета проскальзывания колес в системе навигации применяют ряд средств, таких как эмпирические формулы для расчета скорости проскальзывания, исходя из измерений токов двигателей приводов колес, определение средствами видеонаблюдения характера поверхности перемещения, по которой прокладывается маршрут движения, ограничение заданной скорости движения и радиуса поворота робота, коррекция ошибки позиционирования по положению опорных точек, выделяемых на изображениях окружающего пространства (визуальная одометрия). При этом точность вычислений может оказаться крайне невысокой, а вычислительная нагрузка на процессор робота весьма существенной, иногда и чрезмерной, требующей применения мощных процессоров, заметно увеличивающих стоимость и энергопотребление робота.

Нагрузку на процессор можно снизить, применив предложенные простые алгоритмы определения координат робота методами фотограмметрии и несколько усложнив при этом систему управления электропривода колес с целью снижения их проскальзывания.

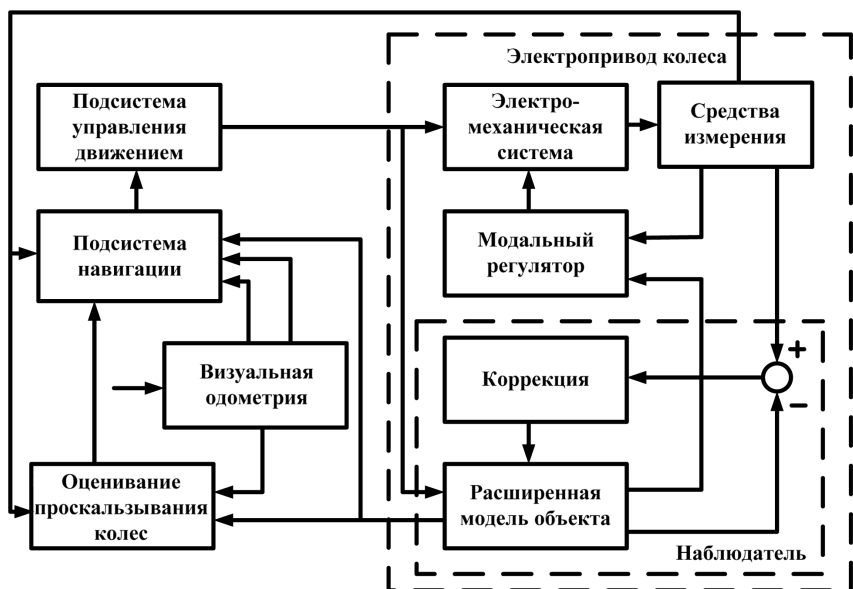
Некоторые методы снижения проскальзывания колес средствами электропривода известны и находят применение в транс-

миссиях автомобилей. Однако у мобильных роботов имеется ряд особенностей, например, отличие скоростей движения и конструктивные особенности механических передач.

Проведенный анализ характеристик трансмиссий разработанных роботов показал, что в этих трансмиссиях могут возникать колебательные процессы, в результате которых скорости связанных упругими связями элементов трансмиссии, а значит и сигналы их датчиков, будут сильно отличаться друг от друга. Так, вследствие упругих деформаций могут не совпадать измеряемая скорость двигателя и скорость приводимого им колеса. Сложный характер будет иметь процесс изменения тока двигателей колес.

Колебательные процессы в трансмиссии снижают точность управления, ухудшают другие показатели, такие, как время торможения, надежность и срок службы ходовой части робота. Колебательность процессов в трансмиссии может существенно ухудшить точность системы навигации робота. Такой характер процессов вызывается разными причинами, среди которых нелинейность сил трения при сцеплении колеса с дорожным покрытием, ведущая к фрикционным автоколебаниям, и компоновка механической передачи, снижающая жесткость механических соединений. При этом в известных конструкциях систем управления электроприводов мобильных роботов упругостью механической передачи и возможностями демпфирования колебаний за счет электромеханической обратной связи зачастую пренебрегают, ограничиваясь рассмотрением одномассовых электромеханических систем. Не применяют и уже известные технические решения схожих проблем, нашедшие применение в других технических областях, например, промышленном электроприводе, где так же в ряде механизмов и машин возникают фрикционные и упругие автоколебания.

Проведенные исследования показали, что для демпфирования колебаний в трансмиссиях роботов и снижения проскальзывания колес целесообразно применять регуляторы состояния с наблюдающими устройствами (наблюдателями). Такой наблюдатель представляет собой модель, сигналы которой используют вместо недоступных напрямую измерению величин. Для повышения точности этой модели, в наблюдатель вводят корректирующие связи по сигналам датчиков тока или скорости, как показано на структурной схеме, представленной на рисунке. Полученные результаты расчетов и моделирования электроприводов мобильных роботов показали, что при разработке мо-




*Взаимодействие подсистем мобильного робота*

дальних регуляторов и наблюдателей для электропривода колес можно ограничиться математической моделью, описывающей двухмассовую электромеханическую систему. Эта модель может расширяться моделью сопротивления движению, что позволяет наблюдателю оценивать величину этого сопротивления. Такую оценку можно использовать как косвенный показатель состояния поверхности перемещения а алгоритме планирования движения, реализованного в подсистеме навигации робота. Сложность программной реализации даже расширенных наблюдателей в системе управления электроприводов существенно меньше сложности реализации более точных алгоритмов визуальной одометрии.

Таким образом, за счет одновременного упрощения алгоритмов визуального ориентирования в пространстве на основе применения методов фотограмметрии и применения рассмотренных подходов к проектированию систем электропривода колес мобильного робота возможно снижение вычислительной нагрузки при повышении точности систем навигации и управления движением мобильного робота. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали эффективность предлагаемых технических решений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang J., Song D., Jayasuriya S. IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots // Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst., San Diego, CA, 2007, pp. 2845–2850.
2. Song Z., Zweiri Y., Seneviratne L., Althoefer K. Nonlinear observer for slip estimation of skid-steering vehicles // Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Orlando, FL, 2006, pp. 1499–1504.
3. Zielinska T., Chmielniak A. Controlling the slip in mobile robots. Proc. 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, 2010, pp. 13–20.
4. Konolige K., Agrawal M., Solá. J. Large-scale visual odometry for rough terrain // In Robotics Research, volume 66 of Springer Tracts in Advanced Robotics, 2011, pp. 201–212.
5. Canudas de Wit C., Tsiotras P., Velenis E., Basset M., Gissinger G. Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction // Veh. Syst. Dyn. 39(3), 2003, pp. 189–226.
6. Ruderman M., Bertram T. Friction model with elasto-plasticity for advanced control applications // Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2010), Montreal, Canada, 2010, pp. 914–919.
7. Mutoh N. Driving and braking torque distribution methods for front-and rear-wheel-independent drive-type electric vehicles on roads with low friction coefficient // IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 10, 2012, pp. 3919–3933.
8. Rodriguez J. M., Meneses R., Orus R. J. Active vibration control for electric vehicle compliant drivetrains // Industrial Electronics Society, IECON 2013, 39th Annual Conference of the IEEE, 2013, pp. 2590–2595. 

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Котляр* Владимир Олегович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина,  
*Татарин* Борис Александрович – кандидат технических наук, доцент, Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 8, pp. 183–189.

UDC 631.3;  
62.5

**B.A. Tatarinovich, V.O. Kotlyarov**

### **CONTROL OF TWO-MASS SYSTEM WITH A DC MOTOR AND CHANGE DIRECTION AT THE EXIT**

Autonomous wheeled robots are able to automatically carry out work on the survey of the territory. Subsystems such robots are closely interrelated. Analysis of the characteristics of transmissions developed by the robots showed that they can occur oscillatory processes, due to the slippage of the wheels and the elasticity of the mechanical transmission. These

oscillatory processes reduce the accuracy of navigation and motion control, reliability, service life and degrade other characteristics of the robot. For damping and reducing slippage in the drive wheels was applied modal controllers with state observers. Their synthesis is based on a mathematical model of two-mass Electromechanical system. Such a model can expand a model of the motion resistance forces, which allows the use of resistance assessment of the navigation system to account for the characteristics of surface movement. The complexity of the software implementation of the observer from the extended model are relatively small. Due to the simplification of algorithms of visual navigation techniques of photogrammetry with simultaneous improvement of the actuators of the wheels of the robot is achieved by improving the accuracy of navigation systems and traffic control, reduced computational load.

Key words: mobile robot, navigation, motion control, wheel slip, power, vibration damping, observer.

## AUTHORS

*Kotlyarov V.O.*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
61002, Kharkiv, Ukraine,

*Tatarinovich B.A.*, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
Belgorod State Agricultural University named after V. Gorin,  
Belgorod, Russia.

## REFERENCES

1. Zhang J., Song D., Jayasuriya S. IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robots. *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, San Diego, CA, 2007, pp. 2845–2850.
2. Song Z., Zweiri Y., Seneviratne L., Althoefer K. Nonlinear observer for slip estimation of skid-steering vehicles. *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Orlando, FL, 2006, pp. 1499–1504.
3. Zielinska T., Chmielniak A. Controlling the slip in mobile robots. *Proc. 13th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2010, pp. 13–20.
4. Konolige K., Agrawal M., Solá J. Large-scale visual odometry for rough terrain. In *Robotics Research*, volume 66 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2011, pp. 201–212.
5. Canudas de Wit C., Tsiotras P., Velenis E., Basset M., Gissinger G. Dynamic friction models for road/tire longitudinal interaction. *Veh. Syst. Dyn.* 39(3), 2003, pp. 189–226.
6. Ruderman M., Bertram T. Friction model with elasto-plasticity for advanced control applications. *Proc. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2010)*, Montreal, Canada, 2010, pp. 914–919.
7. Mutoh N. Driving and braking torque distribution methods for front- and rear-wheel-independent drive-type electric vehicles on roads with low friction coefficient. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 10, 2012, pp. 3919–3933.
8. Rodriguez J.M., Meneses R., Orus R.J. Active vibration control for electric vehicle compliant drivetrains. *Industrial Electronics Society, IECON 2013, 39th Annual Conference of the IEEE*, 2013, pp. 2590–2595.

