

Преимущества и проблемы разработки беспилотных одноколесных балансирующих роботов

В.А. Жмудь¹, А.Ю. Ивойлов¹, И.Л. Рева¹, Л.Д. Димитров², В.Г. Трубин¹, Я. Носек³, Г. Рот⁴

¹Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

²Технический университет Софии, София, Болгария

³Технический университет, Либерец, Чехия

⁴Университет Зигена, Зиген, Германия

Аннотация: В настоящей статье обсуждается направление развития одноколесных балансирующих роботов в самое ближайшее время. Российские производители явно отстают от мирового уровня, однако, количество выставок и конференций по этой тематике стремительно нарастает. При ближайшем рассмотрении, к сожалению, эти мероприятия лишь подтверждают отставание отечественных технологий, под маркой робототехнических устройств демонстрируются помимо прочего и механические транспортные средства с дистанционным управлением, не имеющие никаких датчиков, или имеющие лишь видеокамеры, информация от которых не служит для принятия решения об управлении этими устройствами непосредственно компьютерным интеллектом в этих устройствах, минуя человека. Разумеется, такие устройства не являются роботами, хотя и составляют арсенал средств робототехники. В настоящих роботах компьютерный интеллект должен самостоятельно участвовать в управлении механическим движением, причем этот интеллект не обязательно должен полностью располагаться непосредственно в этих устройствах. В статье дана мотивировка наиболее эффективного направления развития балансирующих роботов, а именно: сочетание балансирования с отсутствием пилота и с движением по заданной программе с целью выполнения заданных функций.

Ключевые слова: балансирующий робот, робототехника, сигвей, автоматика, стабилизация, управление

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивная разработка различных вариантов балансирующих роботов, одноколесных и двухколесных. Среди двухколесных роботов можно выделить два класса: а) с колесами на единой оси, расположенной ортогонально направлению движений (как на сигвее); б) с колесами, расположенными по направлению движения (как на велосипеде и мотоцикле). Оба эти варианта являются структурно неустойчивыми системами. Такие конструкции без использования эффективной системы поддержания равновесия принципиально неустойчивы, в обесточенном состоянии они опрокидываются. В случае «а» равновесие может быть обеспечено системой с отрицательной обратной связью, изменяющей скорость вращения колес таким образом, чтобы центр масс системы всегда находился строго над осью колес, или, если это не достигается в точности, балансировал бы около этого равновесного состояния с небольшими отклонениями от него, которые должны подавляться системой с обратной связью.

Если система типа «а» работает устойчиво, такой балансирующий робот может находиться в покое, когда центр его массы находится выше оси вращения колес, так как он находится строго над осью, условие равновесия сил не нарушается. Нарушение равновесия вне

зависимости от причин вызывает действие обратной связи, которая обеспечивает восстановление равновесия путем вращения колес в соответствующем направлении. Если причина, вызывающая нарушение равновесия, не прекращает своего действия, то колеса не прекращают вращения, достигается динамическое равновесие, то есть равновесие в движении, в динамике. При этом балансирующий робот приходит в движение по направлению отклонения центра масс от равновесного положения, причем, чем больше это отклонение, тем быстрее будет движение, которое может вернуть равновесие.

В пилотируемом балансирующем роботе типа «а» воздействие, нарушающее равновесие, формирует пилот. Поэтому он может управлять направлением и скоростью движения. Для поворота вводятся отдельные воздействия на скорость вращения колес.

Балансирующий робот рассмотренного типа при отсутствии пилота остается приблизительно в одном и том же месте. Для того чтобы заставить такого робота двигаться вперед или назад, требуется дополнительная механическая система, нарушающая равновесие в требуемом направлении и на требуемую величину отклонения под действием электронных управляющих сигналов, которые формируются, исходя из задачи движения. Эта сила может быть заменена программно формируемой величиной задания на скорость, которая

формируется в виде небольшой добавки к сигналу, определяющему отклонение балансирующего робота от состояния равновесия.

Таким образом, чтобы беспилотный балансирующий робот типа «а» двигался в нужном направлении с нужной скоростью, требуется либо дополнительная электромеханическая система, управляемая компьютерным интеллектом, либо дополнительная команда в программу управления. При этом задание на движение (макропрограмма) может передаваться по беспроводной системе связи или автономно формироваться под действием заложенной программы.

О системах типа «б» в литературе сообщений значительно меньше. Пилотируемые двухколесные системы известны давно как мотоциклы, велосипеды, мотороллеры, самокаты и так далее. В этом случае человек поддерживает равновесие в направлении, ортогональном к направлению движения. Равновесие может быть обеспечено тремя способами: 1) за счет отклонения центра масс пилота, компенсирующего отклонения центра масс транспортного средства; 2) за счет изменения поворота первого колеса и, соответственно, вовлечения транспортного средства в вираж, то есть поворот на скорости; 3) сочетанием обоих способов. В первом случае система может и должна продолжать двигаться прямо даже при возникновении наклонов дороги и локальных неровностей. Во втором случае транспортное средство должно совершать поворот для восстановления равновесия. Оба эти «чистые» случая непригодны для полноценного управления транспортным средством, поскольку здесь направление движения является зависимым от условий равновесия. Пилот использует сочетание этих способов поддержания равновесия на уровне интуиции. Беспилотное транспортное средство также должно сочетать оба этих способа, следовательно, для управления двухколесным балансирующим беспилотным роботом требуется обеспечение двух механических воздействий: 1) поворот рулевого колеса (им не обязательно должно быть переднее колесо, может использоваться поворот заднего колеса или поворот обоих колес); 2) перемещение центра масс влево или вправо по отношению к направлению движения.

Разработка одноколесного балансирующего робота в варианте с имеющимся пилотом на практике уже решено, но управление таким транспортным средством требует наличия пилота с определенными навыками езды на нем.

В беспилотном одноколесном варианте все действия, которые совершает пилот, должны быть заменены электромеханической системой, которая, во-первых, обеспечивает нарушение

равновесия для того, чтобы задать направление и скорость движения через систему, которая это равновесие сохраняет за счет вращения колеса, во-вторых, обеспечивает поддержание равновесия в направлении оси этого единственного колеса, в-третьих, формирует необходимые воздействия для поворота.

1. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ДВУХКОЛЕСНЫХ И ОДНОКОЛЕСНЫХ БАЛАНСИРУЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ РОБОТОВ

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку и уточнение научных принципов проектирования высокоточных высокоскоростных робототехнических систем. Результатом таких исследований должны быть научно обоснованные методики проектирования таких систем на примере двухколесных и одноколесных беспилотных балансирующих роботов. Ключевой особенностью таких роботов должно стать устойчивое движение в беспилотном исполнении по заданной траектории по пересеченной местности, включая наклон местности как в направлении движения, так и в направлении, ортогональном направлению движения. Устойчивость достигается дополнительными средствами балансировки, основанными на встроенных высокоскоростных маховиках пониженной массы.

Направление исследования должно включать теоретические исследования, практическую реализацию программно-аппаратных роботов, экспериментальное исследование и модификации полученных действующих устройств.

2. АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Актуальность исследований является следствием, во-первых, необходимости выполнения этих исследований как можно быстрее, во-вторых, возникшей возможностью их выполнения именно сейчас. Необходимость исследований вытекает из нарастающего отставания отечественной техники в области мобильных балансирующих роботов, как пилотируемых, так и беспилотных. Указанные устройства обладают многими преимуществами, они могут применяться для доставки срочных малогабаритных грузов в самые труднодоступные точки, в особенности это относится к одноколесным балансирующим роботам, поскольку они не требуют широкой дороги и могут эффективно работать даже при значительном наклоне в направлении, перпендикулярном направлению движения. Наиболее известные зарубежные фирмы демонстрируют множество подобных устройств, однако на рынок они еще не поступили, все подобные устройства являются уникальными

опытными образцами, результатом работы больших научных коллективов, оснащенных самой современной техникой и имеющих достаточные ресурсы на эти исследования.

Конкурировать с подобными коллективами в области изготовления крупногабаритных и достаточно мощных образцов невозможно. Однако малогабаритные образцы, от которых на данном этапе не требуется длительного ресурса работы батарей, большой мощности, герметичности и прочих важных характеристик, которые все же достигаются достаточно просто с помощью грамотных конструкторских решений, отечественные коллективы вполне могут составить ощутимую конкуренцию.

В сотрудничестве с зарубежными партнерами по линии университетов, перед которым стоят сходные задачи, и у которого доля решенных подзадач приблизительно соизмерима, но она не тождественна, а дополняет долю решенных задач в отечественном коллективе, такая постановка задачи более чем оправдана, что позволяет с уверенностью ожидать успеха.

Малогабаритные образцы представляют большую проблему с позиции эффективного управления, поскольку их быстродействие в несколько раз выше, следовательно, и управление должно быть в несколько раз более быстрым.

Эти проблемы успешно решены в цикле работ, в этой области имеются как результаты интеллектуальной деятельности (патенты, зарегистрированные программные продукты) [1–18], так и научные публикации [19–32]. Развитие методов проектирования регуляторов в этих работах достигло такого уровня, что становится относительно трудно отыскать задачу, которую было бы сложно решить методом численной оптимизации. Полигоном для исследования и улучшения методов синтеза регуляторов может стать наиболее сложное электромеханическое устройство, управление которым представляет собой известную трудность. К таким устройствам можно отнести балансирующий одноколесный беспилотный робот. Это устройство принципиально отличается от пилотируемого одноколесного робота – задачи, которая уже достаточно широко известна а изделия такого вида выпускаются серийно. В отличие от пилотируемого балансирующего робота (БПР), беспилотный балансирующий робот (ББР) не имеет человека, который мог бы поддерживать равновесие в направлении, ортогональном направлению движения. По аналогии можно сравнить циркового акробата, поддерживающего равновесие на одноколесном велосипеде – в таком устройстве вообще нет системы автоматического поддержания равновесия, и все же оно может оставаться в равновесии за счет искусства пилота. В ББР

человеческий фактор устраняется целиком. Кроме того, подобная система может быть различным образом нагружена как неживым грузом (например, гирей), так и живым грузом (например, клеткой с животным), или его аналогом (механическим маховиком со смещенным центром тяжести), что позволит испытать систему наиболее эффективно, объективно и всесторонне.

Задача управления двухколесным балансирующим роботом решена в цикле работ [33–35].

Задачей дальнейших исследований стоит создание одноколесного беспилотного балансирующего робота и обеспечение его эффективного действия в условиях переменной нагрузки, сформированной механическим маховиком со смещенным центром тяжести. Решение данной задачи принципиально важно для развития теории автоматического управления как создание полигона для апробации наиболее современных и эффективных методов проектирования регуляторов для нелинейных нестационарных объектов (нестационарные свойства порождаются изменением массы груза, которая входит в математическую модель объекта). Мешающим воздействием (помехой) является движение маховика по случайному закону, не известному системе автоматической стабилизации. Результаты будут иметь фундаментальное значение для инженерных наук, они могут быть применены в транспортных системах, а также внедрены в учебный процесс.

Основанием для международного сотрудничества является наиболее развитая экспериментальная база европейских университетов и наиболее развитая теоретическая база российских университетов.

Партнерство уже сейчас дало результаты в виде создания балансирующих двухколесных беспилотных роботов малых размеров, что повышает требования к их быстродействию и точности управления [36–58]. В этих устройствах применены тахометрические датчики, гироскопы и датчики ускорения, для пространственной ориентации использовались ультразвуковые датчики и оптические датчики (видеокамеры). Все разработанные ББР используются в учебном процессе для подготовки специалистов по направлению «Автоматика и мехатроника» по курсу «Робототехника».

Болгарские партнеры имеют существенные публикации в области предполагаемого сотрудничества [59–75]. Этот научный задел дает основания для уверенности в скором успехе исследований в указанной области.

3. УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Анализ современного состояния исследований в данной области дает следующие результаты [76–87]. Имеется достаточное количество сообщений о подобных разработках. Как правило, демонстрируются устройства, которые только сохраняют равновесие, как, например, видео по ссылке [88]. При этом равновесие в направлении движения сохраняется за счет вращения ведущих колес, равновесие в ортогональном направлении обеспечивается маховиком, движение по заданной траектории не рассматривается и не обсуждается.

Предлагаемое направление новых исследований обладает принципиальным отличием, которое состоит в том, что будет обеспечено движение по заданной траектории за счет дополнительных маховиков, создающих дисбаланс, что будет вызывать движение вперед или назад. Также будет решена задача поворота и разворота.

4. ЦЕЛИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью дальнейших исследований может стать создание действующих образцов балансирующих беспилотных колесных роботов, включая одноколесные, с целью отработки технологии управления ими для выполнения комплексных задач. Разработка принципов построения таких систем и их верификация путем практических испытаний. Далее эти результаты следует использовать для выполнения ОКР.

Такие исследования могут быть разбиты, например, на следующие задачи:

1. Развитие принципов и методов идентификации сложных объектов и управления ими.

2. Развитие методов цифрового управления в реальном времени и разработка соответствующего программного обеспечения.

3. Разработка лаконичных эффективных конструкций беспилотных балансирующих роботов.

4. Апробация и модификация разработанных методов и принципов и опубликование результатов в высокорейтинговых периодических научных изданиях.

5. Внедрение результатов учебный процесс российских и болгарских университетов.

6. Создание научного задела для дальнейших исследований в области робототехники.

Научная новизна такого подхода заключается в комплексном подходе.

Во-первых, задача не ограничивается простым сохранением равновесия, а распространяется на область движения беспилотного транспортного средства под

действием электромеханических устройств, формирующих требуемый для управления момент. Во-вторых, одновременно параллельно для большей эффективности и для лучшей управляемости предлагается использовать несколько средств достижения равновесия по каждой координате, т.е. предполагается использование маятника не только по ортогональному направлению, но в направлении движения, что не исключает и иных средств обеспечения равновесия. В-третьих, предполагается использование нескольких видов датчиков, по меньшей мере, гироскопических датчиков, тахометрических датчиков, датчиков ускорения. В-четвертых, в отличие от известных балансирующих роботов, предполагается использование робототехнического принципа управления движением на основе информации о пересекаемой местности, что включает использование видеокамер с системой распознавания препятствий (технического зрения) и ультразвуковых датчиков для дополнительного подтверждения природы обнаруженных препятствий по направлению движения. Предполагается также осуществить исследования по целесообразности использования сферического колеса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе реализации проекта будут использованы методы теоретического исследования, литературного поиска, методы численного моделирования и оптимизации сложных мехатронных объектов, методы практической реализации, тестовые и доводочные испытания, разработка и модификация программных средств.

Ожидается, что будут созданы действующие образцы балансирующих беспилотных колесных роботов, включая одноколесные. Будет разработана и отлажена технология управления ими для выполнения комплексных задач. Будут разработаны принципы построения таких систем и выполнена их верификация путем практических испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюл. № 4.
- [2] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюл. № 5.

- [3] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [4] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюл. № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [5] В.А. Жмудь, Заворин А. Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент на изобретение № 2554291. Приоритет от 01.04.14. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.06.15. Бюллетень № 18. Срок действия патента истекает 01.04.34. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [6] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «EdpCtrlServer_v004.py» № 2014612791, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». Авторы: Печников А.Л., Трубин В.Г., Жмудь В.А. Заявка № 2013660275, дата поступления 11 ноября 2013 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014 г.
- [7] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «EdpCtrlClient_v004.py» № 2014612792, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». Авторы: Печников А.Л., Трубин В.Г., Жмудь В.А. Заявка № 2013660287, дата поступления 11 ноября 2013 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014 г.
- [8] Свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ № 2013618271 HC-SR04_Ultrasonic_Driver-v002. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Заявка № 2013616195. Дата поступления 18 июля 2013. Дата гос. регистрации в реестре программ для ЭВМ 04 сентября 2013 г.
- [9] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013615343 NXT_MotorDriver-v003a. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: В.А. Жмудь, А.В. Ескин. Заявка № 2013616195. Дата поступления 26 апреля 2013. Дата гос. регистрации в реестре программ для ЭВМ 05 июня 2013 г.
- [10] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013617769 Bluetooth_HC-05_Driver-v001. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Ескин А.В., Жмудь В.А. Заявка № 2013615378 от 13 февраля 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 августа 2013 г.
- [11] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012618604 DamMonitorNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2012616410 от 27 июля 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2012 г.
- [12] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611161 ZipDataFlowNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660916 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [13] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611162 DefProcNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660917 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [14] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611164 FlashReadNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660919 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [15] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013613341 ZScannerNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2013611238 от 13 февраля 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2013 г.
- [16] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015662198. FORS-DC-Motor-Driver-NSTU. ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Жмудь В. А, Трубин В. Г. Заявка от 30.09.15. Опубликовано 18.11.15.
- [17] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015617101. MPU6050_Alfa-beta_filter. ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Жмудь В. А, Ивойлов А. Ю, Трубин В. Г, Федоров Д. С. Заявка от 18.05.15 Опубликовано 30.06.15
- [18] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015614444. ADXL335_Accelerimeter_Driver. ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Жмудь В. А, Ивойлов А. Ю, Трубин В. Г, Федоров Д. С. Заявка от 29.12.14. Опубликовано 17.04.15
- [19] V. A. Zhmud, A. V. Liapidevskiy. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0. Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24 – 26, 2010 Phuket, Thailand. P. 27–32.
- [20] V. A. Zhmud, V. M. Semibalamut, A. S. Vostrikov. Feedback systems with pseudo local loops. Testing and measurement: techniques and applications: proc. of the 2015 intern. conf. on testing and measurement techniques (TMTA 2015), Thailand, Phuket Island, 16–17 Jan. 2015. London: CRC Press, 2015. P. 411–416.
- [21] Zhmud, V., Zavorin, A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. 2015. Proceedings of the “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015” 10.1109/SIBCON.2015. 7147060.

- [22] Zhmud, V., Pyakillya, B., Semibalamut, V., Trubin, M., Yadrishnikov, O. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 2017. 9(2-2), p. 153–157.
- [23] Zhmud, V., Pyakillya, B. Identification and control of object with time-delay link. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 2017. 9(2-2), p. 109–113.
- [24] V. Zhmud, A. Liapidevskii, Boris Pyakillya. Numerical Optimization of PID-Regulator for Object with Distributed Parameters. *Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering*. ISSN: 2180-1843. 2017. Vol. 9 No. 2-3. P. 9–114.
- [25] F. Ullmann, W. Hardt, V. A. Zhmud. Machine learning algorithms for impact localization on formed piezo metal composites. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 589–593.*
- [26] V.A. Zhmud, D. B. Imekov, K. Yu. Lastochkin and A. V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. *Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014)*. Kos Island, Greece, 4–6 June 2014.
- [27] Liapidevskiy, A.V., Petrov, A.S., Zhmud, V.A., Sherubneva, I.G. Shortcomings of existing systems for registration and legal protection of software products and possible ways to overcome them. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 1015(4), 042066.
- [28] Zhmud, V., Hardt, W. Practical dependance of the error of ADC on conversion frequency: Researches with mathematical modeling. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings*. 2017-November, p. 1–8.
- [29] Zhmud, V.A., Goncharenko, A.M. Modern ways of high-precision frequency measurements. *2016. 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 – Proceedings*. 2016. 1,7802283, p. 309–313.
- [30] Zhmud, V., Semibalamut, V., Vostrikov, A. Design of robust energy-saving regulators by means of optimization software. *Testing and Measurement: Techniques and Applications*. 2015. *Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015*. p. 419–424.
- [31] Using the Numerical Optimization Method for Tuning the Regulator Coefficients of the Two-Wheeled Balancing Robot. Andrei Yu. Ivoilov, Vadim A. Zhmud, Vitaly G. Trubin, Hubert Roth. *2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894*. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P. 228–236.
- [32] Zhmud, V. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. *Pros. Of. International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014): Phuket, Thailand.: Jan. 11-12, 2014. P. 289–296.*
- [33] G. V. Sablina, I. V. Stazhilov, V. A. Zhmud. Development of rotating pendulum stabilization algorithm and research of system properties with the controller. *Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. Т. 1, ч. 3. С. 165-170.*
- [34] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Trubin, V.G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings*. 2018. 2018-March, p. 1–9.
- [35] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Roth, H. The dynamic accuracy increasing for a controlling system by means of the modified algorithm of numerical optimization of the regulator. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings*. 2018. 2018-March, p. 1–7.
- [36] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, O.D. Yadrishnikov. Calculation of regulators for the problem of mechatronics by means of numerical optimization method. *12th International Conference on Actual Problems on Electronic Instrument Engineering APEIE 2014. Proceedings*.
- [37] Zhmud V.A. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters / Zhmud V.A., Reva I.L., Dimitrov L.V. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. V.803. 012185.
- [38] V. Zhmud, L. Dimitrov. Designing of complete multi-channel PD-regulators by numerical optimization with simulation. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. Art. 129 (6 p.)*.
- [39] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov. The influence of the type of the test signal on the result of numerical optimization of regulators. *Journal of Physics: Conference Series*. - 2017. - Vol. 803. - Art. 012186 (6 p.).
- [40] V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov The Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 6 p. ISBN 2380-6516.*
- [41] Zhmud, V., Dimitrov, L., Adaptive systems based on competitive quality criteria. *Proc. of “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015”*. 2015. 7147058. 2-s2.0-84941075474.
- [42] Zhmud, V.A., Frantsuzova, G.A., Dimitrov, L.V., Nosek, J. Experience of international collaboration in preparation of masters in "Mechatronics" with call for funds from Tempus and Erasmus programs. *Journal of Physics: Conference Series*. - 1015 (2018) 032190 - ISBN 1742-6588. - DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032190.
- [43] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. B. Taichenachev. Model study of automatic and automated control of hysteretic object. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S.*

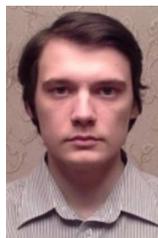
- Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 655–659.
- [44] A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 9 p.
- [45] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. Yu. Ivoylov. Additional Simplification of the Precision Frequency Synthesizer. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P.301 – 306.
- [46] Providing of Smooth Switching of Sine Signals for Precision Frequency Synthesizer. Vadim A. Zhmud2, Lubomir V. Dimitrov, Andrey Yu. Ivoylov. P. 307 – 311.
- [47] Control of Object in the Loop with Feedback Using Imperfect Sensors of Position and Acceleration. Vadim A. Zhmud, Lubomir V. Dimitrov, Vitaly Trubin, Hubert Roth. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P. 312 – 318.
- [48] Zhmud, V.A., Hardt, W., Dimitrov, L.V., Roth, H. Complex issues in regulator designing. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501669.
- [49] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling a second-order multichannel object of dimension 3×2 with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501742.
- [50] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling of second-order two-channel object with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501793.
- [51] Zhmud, V.A., Kondratiev, N.O., Kuznetsov, K.A., Trubin, V.G., Dimitrov, L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(3), 032189.
- [52] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. V. Taichenachev. The use of sigma-delta-ADC in the commutation mode. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 640–643.
- [53] Zhmud, V. A.; Dimitrov, L. V.; Roth, H. A New Approach to Numerical Optimization of a Controller for Feedback System. Proc. of 2nd International Conference on Applied Mechanics, Electronics and Mechatronics Engineering (AMEME) Местоположение: Beijing, Peoples Resp. China. Oct. 22-23, 2017.: DEStech Transactions on Engineering and Technology Research P.: 213–219.
- [54] Zhmud, V., Dimitrov, L., Semibalamut, V., Taichenachev, A. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 2017. 7998568.
- [55] Zhmud, V.A., Semibalamut, V.M., Dimitrov, L.V. Investigation of compensation and other methods for controlling of oscillating objects. Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. 2017. 7884174, p. 538–543.
- [56] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Hardt, W. Automatic identification of controlled objects. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–8.
- [57] Smart Phase Locking of the Frequency of Two Identical Lasers to Each Other. Vadim A. Zhmud, Aleksey V. Taichenachev, Lubomir V. Dimitrov, Vladimir M. Semibalamut. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P.319–326.
- [58] Zhmud, V., Dimitrov, L. Investigation of the causes of noise in the result of multiple digital derivations of signals: Researches with mathematical modeling. 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings. 2017-November, p. 1–9.
- [59] Petrov, P., Georgieva, V. Geometric path planning and tracking control with bounded steering angle for the parking problem of automatic vehicles. 2018. AIP Conference Proceedings 2048,060017
- [60] Petrov, P., Georgieva, V. Adaptive velocity control for a differential drive mobile robot. 2018. 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447091
- [61] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-based position regulation of differential-drive mobile robots. 2018. 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447066
- [62] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-Based Line Tracking Control for Nonholonomic Differential-Drive Mobile Robots. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439461.
- [63] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Ultrasound Image Processing for Improving Diagnose of Renal Diseases. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439641.
- [64] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Visual Marker Recognition with Application to Mobile Robot Localization. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439217.
- [65] Petrov, P. Dynamics and adaptive motion control of a two-wheeled inverted pendulum robot. 2018. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences. 71(7), p. 945-954.
- [66] Georgieva, V., Petrov, P., Nagy, S., Sziová, B. Detecting contours of pathological forms in colonoscopy images using a hybrid method. 2018. Communication, Electromagnetics and Medical Application. 2018-October, pp. 27-30.
- [67] Georgieva, V.M., Mihaylova, A.D., Petrov, P.P. An application of dental X-ray image enhancement. 2017. 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2017 – Proceeding. 2017-October, p. 447-450.
- [68] Petrov, P., Dimitrov, L., Aleksandrov, D. Longitudinal adaptive control of mobile robots in a platoon. 2016. ACM International Conference Proceeding Series. p. 21-25.

- [69] Petrov, P., Nashashibi, F. Automatic vehicle perpendicular parking design using saturated control. 2015. 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AEECT 2015. 7360566.
- [70] Petrov, P., Nashashibi, F. Saturated feedback control for an automated parallel parking assist system. 2014. 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, ICARCV 2014. 7064368, pp. 577-582.
- [71] Petrov, P., Nashashibi, F. Modeling and nonlinear adaptive control for autonomous vehicle overtaking. 2014. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 15(4),6754174, p. 1643-1656.
- [72] Petrov, P., Nashashibi, F. Adaptive steering control for autonomous lane change maneuver. 2013. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. 6629570, p. 835-840.
- [73] Panev, S., Petrov, P., Boumbarov, O., Tonchev, K. Human gaze tracking in 3D space with an active multi-camera system. 2013. Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS 2013. 1,6662719, p. 419-424.
- [74] Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., Petrov, P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. 2012. Journal of Zhejiang University: Science A. 13(12), p. 926-942.
- [75] Petrov, P., Boussard, C., Ammoun, S., Nashashibi, F. A hybrid control for automatic docking of electric vehicles for recharging. 2012. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 6225087, p. 2966-2971.
- [76] URL: https://www.researchgate.net/publication/25867048_8_LQR_Control_for_a_Self-Balancing_Unicycle_Robot_on_Inclined_Plane.
- [77] URL: <https://forums.ni.com/t5/General-Academic-Projects/Robotic-Self-Balancing-Unicycle-Student-Design-Competition-2013/ta-p/3504512>
- [78] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_unicycle.
- [79] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6358103>.
- [80] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6640412>.
- [81] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Yaw-control-for-a-self-balancing-unicycle-robot-two-Daoxiang-Xiang/898b664343043d147ae75a00985f82febafb9972>.
- [82] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-LQR-and-PID-controllers-for-the-self-Hu-Guo/514f020fc9e193431fc001d28628ced028b8d0de>.
- [83] URL: <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/35955>.
- [84] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317325002>.
- [85] URL: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/td-e-07112017-082249/publico/GabrielPereiradaNevesCorr17.pdf>.
- [86] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-robots-makerrobotfriend/>
- [87] URL: https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEwit273ZgszgAhUByrIKHVAmBbcYABAGGgJscg&ohost=www.google.com&cid=C_AASE-RokB2Vehib0-yQVZWshWDrIM4&sig=AOD64_1j13FEuxfBPrQuc5WIE7YZYmD2uA&q=&ved=2ahUKewj0k7nZgszgAhWWwcQBHWbzDA84ChDRDHoECA0QAQ&adurl=.
- [88] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-robots-makerrobotfriend/>



Вадим Аркадьевич Жмуд - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru

630073, Новосибирск, Просп. К. Маркса, д. 20



Андрей Юрьевич Ивойлов - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: iau13hv@mail.ru

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



Иван Леонидович Рева – декан факультета Автоматики и вычислительной техники НГТУ, к.т.н. Основное направление научных исследований - защита речевой информации. Имеет более 20 публикаций

E-mail: reva@corp.nstu.ru

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



Д.т.н. Любомир Димитров – Профессор, Технический университет Софии, машиностроительный факультет, Болгария. Области интереса: мехатроника, адаптивное и оптимальное управление, интеллектуальные системы диагностики и управления, MEMS.

E-mail: lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg



Виталий Геннадьевич Трубин – старший преподаватель кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».

E-mail: trubin@ngs.ru

Новосибирск, 630073, просп. К. Маркса, д. 20, НГТУ



Д.т.н. **Ярослав Носек** - профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарных исследований в Техническом университете, Либерец, Чешская Республика.
E-mail: jaroslav.nosek@tul.cz



Губерт Рот – Заведующий кафедрой Автоматизированного управления в университете Зигена, профессор, г. Зиген, Германия

E-mail: hubert.roth@uni-siegen.de

Адольф-Рейчвейн Страссе 2, Зиген, Германия

Статья получена 10.02.2019.

Advantages and Problems of Developing Unmanned One-Wheel Balancing Robots

V.A. Zhmud¹, A.Yu. Ivoilov¹, L.D. Dimitrov², V.G. Trubin¹, J. Nosek³, H. Roth⁴

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

²Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

³Technical University, Liberec, Czech Republic

⁴University of Siegen, Siegen, Germany

Abstract: This article discusses the direction of development of one-wheeled balancing robots in the near future. Russian manufacturers are clearly lagging behind the world level, however, the number of exhibitions and conferences on this subject is growing rapidly. On closer examination, unfortunately, these events only confirm the lag of domestic technologies; under the brand name of robotic devices, among other things, motorized vehicles with remote control, having no sensors, or having only video cameras, information from which is not used for making management decisions, are demonstrated these devices directly computer intelligence in these devices, bypassing the person. Of course, such devices are not robots, although they make up the arsenal of tools for robotics. In these robots, computer intelligence must independently participate in the control of mechanical motion, and this intelligence does not necessarily have to be completely located directly in these devices. The article gives the motivation of the most effective direction of development of the balancing robots, namely: a combination of balancing with the absence of a pilot and movement according to a given program in order to perform specified functions.

Key words: balancing robot, robotics, sigway, automation, stabilization, control

REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud. Feedback system. Patent for invention No. 2540461. Application No. 2013145173, priority from 08.10.2013. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation on December 19, 2014. The patent expires on October 8, 2033. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, 3/36. Bul. No. 4
- [2] V.A. Zhmud. Feedback system. The patent for the invention No. 2541684. Application No. 2013146115, priority from 15.10.2013. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation on January 15, 2015. The patent expires on October 25, 2033. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, 3/36. Bul. No. 5
- [3] V.A. Zhmud. Feedback system. The patent for the invention № 2566339. Priority from 08.10.2013. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation on October 20, 2015. Byul. Number 29. The term of the patent expires 08.10.2033. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, 3/36.
- [4] V.A. Zhmud. Feedback system. The patent for the invention № 2584925. Priority from 03/03/15. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation 27.04.16. Bul. Number 14. The term of the patent expires 05.03.35. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, G01P 3/36.
- [5] V.A. Zhmud, A. Zavorin. The structure of the model for the optimization of a feedback system. The patent for the invention № 2554291. Priority from 04/01/14. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation 27.06.15. Bulletin No. 18. The patent expires on 01/04/34. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, G01P 3/36.
- [6] Certificate of state registration of the computer program “EdpCtrlServer_v004.ru” No. 2014612791, holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Novosibirsk State Technical University”. Authors: Pechnikov A.L., Trubin V.G., Zhmud V.A. Application No. 2013660275, the date of receipt is November 11, 2013, the date of state registration in the Register of Computer Programs March 6, 2014
- [7] Certificate of state registration of the computer program “EdpCtrlClient_v004.ru” No. 2014612792, holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Novosibirsk State Technical University”. Authors: Pechnikov A.L., Trubin V.G., Zhmud V.A. Application No. 2013660287, the date of receipt is November 11, 2013, the date of state registration in the Register of Computer Programs March 6, 2014.
- [8] Computer Program Registration Certificate No. 2013618271 HC-SR04 Ultrasonic_Driver-v002. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: V.A. Zhmud, V.G. Trubin. Application No. 2013616195. Date of receipt July 18, 2013. Date of state registration in the register of computer programs September 4, 2013
- [9] Computer program registration certificate No. 2013615343 NXT_MotorDriver-v003a. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: V.A. Zhmud, A.V. Eskin Application No. 2013616195. Date of receipt April 26, 2013. Date of state registration in the register of computer programs June 5, 2013

- [10] Computer program registration certificate No. 2013617769 Bluetooth_HC-05_Driver-v001. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Eskin AV, Zhmud V.A. Application No. 2013615378 dated February 13, 2013. Registered in the Register of Computer Programs on August 22, 2013.
- [11] Computer Program Registration Certificate No. 2012618604 DamMonitorNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Goncharenko A.M., Zhmud V.A. Application No. 2012616410 of July 27, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on September 21, 2012.
- [12] Computer Program Registration Certificate No. 2013611161 ZipDataFlowNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Tereshkin D.O., Zhmud V.A. Application No. 2012660916 dated December 11, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2013.
- [13] Computer Program Registration Certificate No. 2013611162 DefProcNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Tereshkin D.O., Zhmud V.A. Application No. 2012660917 dated December 11, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2013.
- [14] Computer registration certificate No. 2013611164 FlashReadNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Tereshkin D.O., Zhmud V.A. Application No. 2012660919 dated December 11, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2013.
- [15] Computer Program Registration Certificate No. 2013613341 ZScannerNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Goncharenko A.M., Zhmud V.A. Application No. 2013611238 of February 13, 2013. Registered in the Register of Computer Programs on February 2, 2013.
- [16] Computer program registration certificate No. 2015662198. FORS-DC-Motor-Driver-NSTU. FSBEI HPE NSTU. Russia. Authors: Zhmud V. A., Trubin V. G. Application dated 30.09.15. Published 11/18/15.
- [17] Computer Program Registration Certificate No. 2015617101. MPU6050_Alfa-beta_filter. FSBEI HPE NSTU. Russia. Authors: Zhmud V. A., Ivoilov A. Yu., Trubin V. G., Fedorov DS. Application dated 05/18/15
- [18] Computer program registration certificate No. 2015614444. ADXL335_Accelerimeter_Driver. FSBEI HPE NSTU. Russia. Authors: Zhmud V. A., Ivoilov A. Yu., Trubin V. G., Fedorov D. S. Application from 12/29/14. Posted 04/17/15.
- [19] V.A. Zhmud, A.V. Liapidevskiy. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0. Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24 – 26, 2010 Phuket, Thailand. P. 27–32.
- [20] V. A. Zhmud, V. M. Semibalamut, A. S. Vostrikov. Feedback systems with pseudo local loops. Testing and measurement: techniques and applications: proc. of the 2015 intern. conf. on testing and measurement techniques (TMTA 2015), Thailand, Phuket Island, 16–17 Jan. 2015. London: CRC Press, 2015. P. 411–416.
- [21] Zhmud, V., Zavorin, A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. 2015. Proceedings of the “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015” 10.1109/SIBCON.2015. 7147060.
- [22] Zhmud, V., Pyakillya, B., Semibalamut, V., Trubin, M., Yadrishnikov, O. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. 9(2-2), p. 153–157.
- [23] Zhmud, V., Pyakillya, B. Identification and control of object with time-delay link. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. 9(2-2), p. 109–113.
- [24] V. Zhmud, A. Liapidevskii, Boris Pyakillya. Numerical Optimization of PID-Regulator for Object with Distributed Parameters. Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering. ISSN: 2180-1843. 2017. Vol. 9 No. 2-3. P. 9–114.
- [25] F. Ullmann, W. Hardt, V. A. Zhmud. Machine learning algorithms for impact localization on formed piezo metal composites. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 589–593.
- [26] V.A. Zhmud, D. B. Imekov, K. Yu. Lastochkin and A. V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014). Kos Island, Greece, 4–6 June 2014.
- [27] Liapidevskiy, A.V., Petrov, A.S., Zhmud, V.A., Sherubneva, I.G. Shortcomings of existing systems for registration and legal protection of software products and possible ways to overcome them. Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(4), 042066.
- [28] Zhmud, V., Hardt, W. Practical dependance of the error of ADC on conversion frequency: Researches with mathematical modeling. 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings. 2017-November, p. 1–8.
- [29] Zhmud, V.A., Goncharenko, A.M. Modern ways of high-precision frequency measurements. 2016. 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 – Proceedings. 2016. 1,7802283, p. 309–313.
- [30] Zhmud, V., Semibalamut, V., Vostrikov, A. Design of robust energy-saving regulators by means of optimization software. Testing and Measurement: Techniques and Applications. 2015. Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015. p. 419–424.
- [31] Using the Numerical Optimization Method for Tuning the Regulator Coefficients of the Two-Wheeled Balancing Robot. Andrei Yu. Ivoilov, Vadim A. Zhmud, Vitaly G. Trubin, Hubert Roth. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P. 228–236.
- [32] Zhmud, V. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. Pros. Of. International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014): Phuket, Thailand.: Jan. 11-12, 2014. P. 289–296.

- [33] G. V. Sablina, I. V. Stazhilov, V. A. Zhmud. Development of rotating pendulum stabilization algorithm and research of system properties with the controller. Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. Т. 1, ч. 3. С. 165-170.
- [34] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Trubin, V.G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–9.
- [35] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Roth, H. The dynamic accuracy increasing for a controlling system by means of the modified algorithm of numerical optimization of the regulator. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–7.
- [36] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, O.D. Yadrishnikov. Calculation of regulators for the problem of mechatronics by means of numerical optimization method. 12th International Conference on Actual Problems on Electronic Instrument Engineering APEIE 2014. Proceedings.
- [37] Zhmud V.A. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters / Zhmud V.A., Reva I.L., Dimitrov L.V. Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V.803. 012185.
- [38] V. Zhmud, L. Dimitrov. Designing of complete multi-channel PD-regulators by numerical optimization with simulation. International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. Art. 129 (6 p.).
- [39] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov. The influence of the type of the test signal on the result of numerical optimization of regulators. Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - Vol. 803. - Art. 012186 (6 p.).
- [40] V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov The Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 6 p. ISBN 2380-6516.
- [41] Zhmud, V., Dimitrov, L., Adaptive systems based on competitive quality criteria. Proc. of “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015”. 2015. 7147058. 2-s2.0-84941075474.
- [42] Zhmud, V.A., Frantsuzova, G.A., Dimitrov, L.V., Nosek, J. Experience of international collaboration in preparation of masters in "Mechatronics" with call for funds from Tempus and Erasmus programs. Journal of Physics: Conference Series. - 1015 (2018) 032190 - ISBN 1742-6588. - DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032190.
- [43] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. B. Taichenachev. Model study of automatic and automated control of hysteretic object. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 655–659.
- [44] A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 9 p.
- [45] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. Yu. Ivoylov. Additional Simplification of the Precision Frequency Synthesizer. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P.301 – 306.
- [46] Providing of Smooth Switching of Sine Signals for Precision Frequency Synthesizer. Vadim A. Zhmud2, Lubomir V. Dimitrov, Andrey Yu. Ivoylov. P. 307 – 311.
- [47] Control of Object in the Loop with Feedback Using Imperfect Sensors of Position and Acceleration. Vadim A. Zhmud, Lubomir V. Dimitrov, Vitaly Trubin, Hubert Roth. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P. 312 – 318.
- [48] Zhmud, V.A., Hardt, W., Dimitrov, L.V., Roth, H. Complex issues in regulator designing. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501669.
- [49] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling a second-order multichannel object of dimension 3×2 with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501742.
- [50] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling of second-order two-channel object with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501793.
- [51] Zhmud, V.A., Kondratiev, N.O., Kuznetsov, K.A., Trubin, V.G., Dimitrov, L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(3), 032189.
- [52] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. V. Taichenachev. The use of sigma-delta-ADC in the commutation mode. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 640–643.
- [53] Zhmud, V. A.; Dimitrov, L. V.; Roth, H. A New Approach to Numerical Optimization of a Controller for Feedback System. Proc. of 2nd International Conference on Applied Mechanics, Electronics and Mechatronics Engineering (AMEME) Местоположение: Beijing, Peoples Resp. China. Oct. 22-23, 2017.: DEStech Transactions on Engineering and Technology Research P.: 213–219.
- [54] Zhmud, V., Dimitrov, L., Semibalamut, V., Taichenachev, A. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 2017. 7998568.
- [55] Zhmud, V.A., Semibalamut, V.M., Dimitrov, L.V. Investigation of compensation and other methods for controlling of oscillating objects. Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. 2017. 7884174, p. 538–543.
- [56] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Hardt, W. Automatic identification of controlled objects. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–8.

- [57] Smart Phase Locking of the Frequency of Two Identical Lasers to Each Other. Vadim A. Zhmud, Aleksey V. Taichenachev, Lubomir V. Dimitrov, Vladimir M. Semibalmut. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P.319–326.
- [58] Zhmud, V., Dimitrov, L. Investigation of the causes of noise in the result of multiple digital derivations of signals: Researches with mathematical modeling. 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings. 2017-November, p. 1–9.
- [59] Petrov, P., Georgieva, V. Geometric path planning and tracking control with bounded steering angle for the parking problem of automatic vehicles. 2018. AIP Conference Proceedings 2048,060017
- [60] Petrov, P., Georgieva, V. Adaptive velocity control for a differential drive mobile robot. 2018. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447091
- [61] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-based position regulation of differential-drive mobile robots. 2018. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447066
- [62] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-Based Line Tracking Control for Nonholonomic Differential-Drive Mobile Robots. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439461.
- [63] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Ultrasound Image Processing for Improving Diagnose of Renal Diseases. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439641.
- [64] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Visual Marker Recognition with Application to Mobile Robot Localization. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439217.
- [65] Petrov, P. Dynamics and adaptive motion control of a two-wheeled inverted pendulum robot. 2018. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences. 71(7), p. 945-954.
- [66] Georgieva, V., Petrov, P., Nagy, S., Sziová, B. Detecting contours of pathological forms in colonoscopy images using a hybrid method. 2018. Communication, Electromagnetics and Medical Application. 2018-October, pp. 27-30.
- [67] Georgieva, V.M., Mihaylova, A.D., Petrov, P.P. An application of dental X-ray image enhancement. 2017. 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2017 – Proceeding. 2017-October, p. 447-450.
- [68] Petrov, P., Dimitrov, L., Aleksandrov, D. Longitudinal adaptive control of mobile robots in a platoon. 2016. ACM International Conference Proceeding Series. p. 21-25.
- [69] Petrov, P., Nashashibi, F. Automatic vehicle perpendicular parking design using saturated control. 2015. 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AECT 2015. 7360566.
- [70] Petrov, P., Nashashibi, F. Saturated feedback control for an automated parallel parking assist system. 2014. 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, ICARCV 2014. 7064368, pp. 577-582.
- [71] Petrov, P., Nashashibi, F. Modeling and nonlinear adaptive control for autonomous vehicle overtaking. 2014. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 15(4),6754174, p. 1643-1656.
- [72] Petrov, P., Nashashibi, F. Adaptive steering control for autonomous lane change maneuver. 2013. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. 6629570, p. 835-840.
- [73] Panev, S., Petrov, P., Boumbarov, O., Tonchev, K. Human gaze tracking in 3D space with an active multi-camera system. 2013. Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS 2013. 1,6662719, p. 419-424.
- [74] Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., Petrov, P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. 2012. Journal of Zhejiang University: Science A. 13(12), p. 926-942.
- [75] Petrov, P., Boussard, C., Ammoun, S., Nashashibi, F. A hybrid control for automatic docking of electric vehicles for recharging. 2012. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 6225087, p. 2966-2971.
- [76] URL: https://www.researchgate.net/publication/258670488_LQR_Control_for_a_Self-Balancing_Unicycle_Robot_on_Inclined_Plane.
- [77] URL: <https://forums.ni.com/t5/General-Academic-Projects/Robotic-Self-Balancing-Unicycle-Student-Design-Competition-2013/ta-p/3504512>
- [78] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_unicycle.
- [79] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6358103>.
- [80] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6640412>.
- [81] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Yaw-control-for-a-self-balancing-unicycle-robot-two-Daoxiong-Xiang/898b664343043d147ae75a00985f82febf9972>.
- [82] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-LQR-and-PID-controllers-for-the-self-Balancing-Unicycle-Robot-Guo/514f020fc9e193431fc001d28628ced028b8d0de>.
- [83] URL: <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/35955>.
- [84] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S214785317325002>.
- [85] URL: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-07112017-082249/publico/GabrielPereiradaNevesCorr17.pdf>.
- [86] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-makerrobotfriend/>
- [87] URL: https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEwit273ZgszgAhUByrIKHVAmBBcYA BAGGgJscg&ohost=www.google.com&cid=CAASE-RokB2Vehib0-yQVZWshWDrIM4&sig=AOD64_1j13FEuxfBPrQu_c5WIE7YZYmD2uA&q=&ved=2ahUKEwj0k7nZgs

zgAhWWwcQBHWbzDA84ChDRDHoECA0QAQ&adurl=

[88] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-robots-makerobotfriend/>.



Vadim Zhmud – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.

E-mail: oao_nips@bk.ru

630073, Novosibirsk,
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



Andrey Ivoylov – PhD-student of Department of Automatics of NSTU.

E-mail: iau13hv@mail.ru

630073, Novosibirsk,
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov**.
Full Professor.

Technical University of Sofia,
Faculty of Mechanical Engineering,
Bulgaria
Mechatronics, Adaptive and optimal
control, Intelligent diagnostic and
control systems, MEMS.

E-mail: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg



Ivan Reva – Dean of Faculty of Automation and Computer Techniques in NSTU, PhD, Ass. Professor.

E-mail: reva@corp.nstu.ru

630073, Novosibirsk,
srt. Prosp. K. Marksa, h. 20



Vitaly Trubin - head of the department. lab. Automatics Department of NSTU, Director of KB Automatics.

E-mail: trubin@ngs.ru



Dr. of Techn. Sci. **Jaroslav Nosek** – Professor of Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies in Technical University, Liberec, Czech Republic.

E-mail: jaroslav.nosek@tul.cz



Hubert Roth – Head of the Department of Automatic Control Engineering of University of Siegen, Professor, Doctor of Sci., **Germany**

E-mail: hubert.roth@uni-siegen.de

Adolf-Reichwein-Strasse 2, Siegen,
Germany

The paper has been received on 10.02.2019.