

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

АДАМОВА БОРИСА ИГОРЕВИЧА

«Применение аппарата неголономных связей в задачах идентификации параметров и управления движением», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Актуальность темы диссертации Б. И. Адамова обуславливается тем, что в работа посвящена решению задач, возникающих в активно развивающихся прикладных научно-технических областях: робототехнике, навигации и управлении движением, теории гироскопических датчиков, адаптивном управлении, стабилизации нелинейных систем.

Рассмотрим содержание диссертационной работы Б. И. Адамова. Она состоит из введения, четырёх глав, заключения списка литературы и приложения.

Введение содержит общую характеристику работы, подробно рассматривается актуальность темы исследования и степень её разработанности в опубликованных научных работах.

По смысловому содержанию главы диссертации можно сгруппировать в две части. В главах 1 и 2 строятся алгоритмы идентификации и оценивания параметров, учитывающие ограничения в виде равенств на оценки и их производные по времени. В главах 3 и 4 полученные ранее результаты находят своё применение в задачах идентификации реальных мехатронных систем – кольцевого резонатора гироскопа и мобильной платформы всенаправленного движения. Вопросы применения аппарата неголономных связей в задачах управления рассматриваются в главе 4 на примере конкретной механической системы, а также затрагиваются в главе 1.

Глава 1 «Методы аналитической механики в задаче адаптивной идентификации с параметрическими связями» начинается с обзора публикаций, посвящённых адаптивной идентификации и задачам оценивания при наличии ограничений в виде равенств; задачам исследования и синтеза динамики систем различной физической природы со связями. Решена задача адаптивной идентификации параметров систем с линейными параметрическими моделями. Искомые величины удовлетворяют ограничениям в виде равенств («параметрическим связям»). На этих соотношениях строятся уравнения неголономных связей, которым удовлетворяют оценки параметров и их производные. Представление параметрических связей в дифференциальной форме позволило привлечь для решения поставленной задачи аппарат неголономной механики: с помощью принципа наименьшего принуждения Гаусса построено семейство

алгоритмов с проекцией. Для уменьшения количества необходимых вычислений, построенные алгоритмы представлены в терминах «параметрических псевдоскоростей - аналогов псевдоскоростей в задачах аналитической механики. Проведена аналогия между алгоритмом идентификации параметров со связями и задачей стабилизации аффинных управляемых систем. Предложена методика стабилизации объектов управления, предполагающая отождествление управляющих воздействий с множителями, соответствующих неголономным связям специального вида.

Глава 2 «Оптимальные алгоритмы идентификации с параметрическими связями» посвящена разработке оптимальных алгоритмов идентификации параметров со связями. Оценки строятся из условия минимума интегральной квадратичной ошибки прогноза параметрической модели объекта. Предложены субоптимальные алгоритмы идентификации, в которых используется регуляризация дифференциальных уравнений для множителей, соответствующих параметрическим связям. Установлены аналогии между задачами идентификации со связями и задачами динамики механических систем с сервосвязями. Построен алгоритм идентификации, оптимальный в смысле модифицированной квадратичной ошибки, являющийся частным случаем расширенного фильтра Калмана. Исследована сходимость полученных оптимальных алгоритмов идентификации в линейном приближении.

Глава 3 «Идентификация параметров математической модели и установившихся колебаний кольцевого резонатора волнового твердотельного гироскопа» начинается с обзора публикаций на указанную тему. Колебания резонатора возбуждаются по второй основной форме и описываются двумя обобщёнными координатами, удовлетворяющими нелинейной системе уравнений с неизвестными коэффициентами. Решена задача идентификации этих коэффициентов по измерениям установившихся колебаний резонатора, возбуждаемых с различными частотами. Построены алгоритмы идентификации характеристик установившихся нелинейных колебаний, представляемых суммой двух гармоник. Особое внимание уделено задаче оценивания частоты таких колебаний независимо от амплитуд. Для решения указанной задачи была построена параметрическая модель, коэффициенты которой удовлетворяют дополнительному соотношению, задающего параметрическую связь. Построены алгоритмы идентификации частоты, как учитывающие эту связь, так и игнорирующие её. Произведено сопоставление результатов их работы. Для решения рассматриваемой задачи было применено большинство алгоритмов, разработанных в Главах 1 и 2.

Главе 4 «Мобильный робот youBot: алгоритмы идентификации и управления» начинается с обзора публикаций, посвящённых динамике и управлению мобильными колёсными роботами, манипуляторами на подвижных основаниях, мобильными платформами всенаправленного

движения, оснащёнными роликонесущими колёсами. Примером последней является роботизированная платформа KUKA youBot с двумя парами соосных тесапип-колёс. Для указанной системы построены уравнения кинематики и динамики. Использовалось предположение об идеальном контакте роликонесущих колёс с полом. Проведена идентификация неизвестных коэффициентов в полученных уравнениях движения. Построен закон управления мобильным роботом с целью реализации требуемого закона изменения вектора скорости произвольной точки платформы. Такое программное движение рассматривается как совокупность неголономных связей, налагаемых на динамику системы, а их реакции отождествляются с управляющими обобщёнными силами. Описанный алгоритм формирования управления применён для реализации равномерного движения точки платформы по окружности и для реализации погони мобильного робота за подвижным объектом. Проведено исследование стационарных вращений платформы, возникающих в процессе программного движения вдоль окружности. Построен алгоритм идентификации параметров математической модели робота, совершающего поступательное движение, с учётом податливости элементов механических передач колёс. В процессе построения параметрической модели в рассматриваемой задаче из-за исключения неизмеряемых переменных возникают параметрические связи. Для нахождения оценок параметров системы использован оптимальный алгоритм идентификации, разработанный в Главе 2.

Основные результаты, получены в диссертационной работе **впервые**. **Достоверность** результатов обуславливается применением в работе строгого математического аппарата неголономной механики, теории устойчивости и стабилизации движения, асимптотической теории сингулярно возмущённых дифференциальных уравнений А. Н. Тихонова, а также представлением промежуточных этапов получения результатов в тексте диссертации.

Теоретическая и практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Математический аппарат теории неголономных систем применён для получения новых решений задач идентификации параметров, стабилизации аффинных систем управления, управления движением.
2. Показано, что введение неинтегрируемых связей позволяет получить новые классы решений задач, в первоначальной постановке которых связи не фигурируют. Это задача стабилизации аффинных управляемых систем; задача оценивания для систем с нелинейной параметризацией (с разделяющимися параметрами и временем).
3. Построена математическая модель мобильной платформы всенаправленного движения KUKA youBot, учитывающая силы вязкого

трения и податливость в сочленениях тел. Построен алгоритм идентификация параметров полученной модели.

4. Построен алгоритм управления мобильной всенаправленной платформой KUKA youBot с целью реализации программного движения её произвольной точки.
5. Построен алгоритм расчёта управляющих воздействий для мобильного робота youBot с целью преследования подвижный объекта, использующий измерения его координат относительно платформы, и не требующий численного дифференцирования этой информации.

К тексту диссертации и автореферату имеются следующие **замечания**:

1. Параметрическая сходимость алгоритмов идентификации, полученных в Главах 1 и 2 исследуется лишь в линейном приближении. В примерах, иллюстрирующих работоспособность алгоритмов, полученные критерии сходимости не используются.
2. Чувствительность построенных алгоритмов идентификации параметров к аддитивным погрешностям параметрической модели исследуется лишь качественно на конкретном примере.
3. В тексте работы отсутствуют примеры, иллюстрирующие работоспособность алгоритмов идентификации со стабилизированными уравнениями связей, полученных в § 1.5.
4. Примеры, иллюстрирующие работоспособность закона управления, построенного в § 1.6 с целью стабилизации аффинной системы, следовало включить в текст диссертации, а не ограничиваться ссылкой на публикацию.
5. В § 4.5.3 построен новый алгоритм погони мобильного робота за подвижной целью. Он используется лишь с целью проиллюстрировать метод формирования управляющих воздействий, рассматриваемый в § 4.5. Сравнение предложенного алгоритма погони с некоторыми известными производится в публикациях соискателя, а в тексте диссертации не освещается.
6. В большинстве случаев в формулах не указываются аргументы функций. Это определённым образом затрудняет восприятие материала.
7. Отсутствует список используемых в работе обозначений.
8. В тексте работы и в автореферате присутствуют опечатки и синтаксические ошибки. В частности, в списке литературы допущена досадная опечатка в фамилии А. Н. Тихонова.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы и объясняются частичной неопытностью автора, и не снижают

ценности полученных результатов. Основные результаты диссертационной работы отражены в 15 публикациях, 3 из которых входят в Перечень журналов и изданий, утверждённых ВАК РФ.

Диссертация является завершённой и целостной научно-квалификационной работой, а её тема соответствует специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика». В диссертационной работе разработаны положения, совокупность которых можно рассматривать как определённый вклад в механику управляемых неголономных систем, теорию адаптивной идентификации. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа «**Применение аппарата неголономных связей в задачах идентификации параметров и управления движением**» соответствует критериям «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор **Адамов Борис Игоревич** заслуживает присуждения ему и учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник
лаборатории навигации и управления
Института механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Шамолин М. В.

Почтовый адрес: 119192 Москва, Мичуринский проспект, д. 1.

Телефон: +7 (495) 939-51-43

Электронная почта: shamolin@rambler.ru, shamolin.maxim@yandex.ru

Дата составления отзыва:

24 ноября 2016 г.

Подпись ведущего научного сотрудника института механики МГУ, профессора механико-математического факультета МГУ М. В. Шамолина заверяю:

и. о. декана механико-математического факультета МГУ,
д. ф.-м. н., проф.



В. Н. Чубариков