

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»

Рассматриваемая диссертационная работа Б. И. Адамова состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. **Введение** содержит общую характеристику работы, подробно рассматривается актуальность темы исследования и степень её разработанности в опубликованных научных работах.

Глава 1 «Методы аналитической механики в задаче адаптивной идентификации с параметрическими связями» и **Глава 2 «Оптимальные алгоритмы идентификации с параметрическими связями»** посвящены решению задачи адаптивной идентификации параметров для динамических систем с линейной параметризацией. Искомые параметры удовлетворяют дополнительным условиям в виде равенств — параметрическим связям. На основе соотношений, определяющих эти ограничения, 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. Разработаны рекуррентные алгоритмы идентификации параметров, учитывающих дополнительные ограничения на оценки:

- семейство алгоритмов с проекцией, полученное путём применения принципа наименьшего принуждения Гаусса;
- семейство алгоритмов, оптимальных и субоптимальных с точки зрения интегральной квадратичной невязки;
- алгоритмы идентификации, оптимальные с точки зрения модифицированной квадратичной ошибки.

Для уменьшения количества необходимых вычислений, построенные алгоритмы идентификации параметров представлены в терминах вспомогательных переменных («параметрических псевдоскоростей»), определяемых аналогично псевдоскоростям в аналитической механике. Проведена аналогия между задачами идентификации параметров со связями и задачей стабилизации аффинных управляемых систем, позволившая построить новый класс стабилизирующих обратных связей. Установлены аналогии между полученными оптимальными алгоритмами идентификации и алгоритмами синтеза

динамики механических систем с сервосвязями. Исследована сходимость оценок параметров, вырабатываемых с учётом связей, в линейном приближении.

Объектом исследования в **Главе 3 «Идентификация параметров математической модели и установившихся колебаний кольцевого резонатора волнового твердотельного гироскопа»** является упругий чувствительный элемент, динамика которого описывается в одномодовом приближении уравнениями класса «обобщённого маятника Фуко» с нелинейными кубическими консервативными силами. Решена задача идентификации параметров резонатора по измерениям его установившихся колебаний, а также вспомогательные задачи определения характеристик таких колебаний. Особое внимание уделено разработке алгоритмов идентификации частоты установившихся нелинейных колебаний, описываемых двумя гармониками ряда Фурье. Выбранный в работе способ построения линейной параметрической модели в указанной задаче приводит к появлению параметрической связи. Для учёта этой связи было использовано большинство из построенных в **Главах 1 и 2** алгоритмов идентификации.

Объектом исследования в **Главе 4 «Мобильный робот youBot: алгоритмы идентификации и управления»** является роботизированная платформа всенаправленного движения KUKA youBot, оснащённая двумя парами соосных роликонесущих колёс типа «Mecanum». Из условия идеального непрерывного контакта роликов колёс с горизонтальной подстилающей поверхностью получены кинематические соотношения для платформы. Построены уравнения Аппеля для мобильного робота с учётом сил линейного вязкого трения в сочленениях тел. Проведена идентификация параметров полученной математической модели. Предложен закон управления для реализации требуемого закона изменения вектора скорости произвольной точки платформы, согласованного с неголономными связями. Управляющие обобщённые силы вычисляются как реакции таких связей. Полученная процедура формирования управления применена в задаче реализации равномерного движения точки платформы вдоль окружности, а также для разработки алгоритма погони мобильного робота за подвижным объектом. В первом из перечисленных примеров проведено исследование существования и устойчивости стационарных вращений платформы, возникающих в процессе программного движения вдоль окружности. Завершает главу построение алгоритма идентификации параметров математической модели робота с учётом податливости в сочленениях колёс и платформы. В рассматриваемой задаче имеют место параметрические связи; для нахождения искомых оценок параметров был привлечён оптимальный алгоритм, разработанный в **Главе 2**.

Выбранная тема диссертации **актуальна**: в работе решены задачи, возникающие в мобильной робототехнике, теории навигационных гироскопических датчиков, теории адаптивного управления — практически значимых и динамично развивающихся сферах науки и техники.

Большинство результатов, полученных в рамках диссертации являются **новыми**. **Достоверность** результатов обуславливается применением в работе строгого математического аппарата (теории неголономных механических систем, теории устойчивости, теории адаптивной идентификации и детерминированного оценивания, асимптотической теории сингулярно возмущённых дифференциальных уравнений); промежуточные этапы получения результатов приводятся в тексте работы и поясняются.

Теоретическая и практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Математический аппарат теории неголономных систем применён для получения новых решений широкого класса задач, относящихся к различным областям науки: идентификации параметров, стабилизации аффинных систем управления, управлению движением.
2. Построена математическая модель мобильной платформы всенаправленного движения KUKA youBot, учитывающая силы вязкого трения и податливость в сочленениях тел. Проведена идентификация параметров полученной модели.
3. Построен алгоритм управления указанной мобильной платформой с целью реализации программного движения её произвольной точки.
4. Построен алгоритм расчёта управляющих воздействий для мобильного робота youBot с целью преследования подвижного объекта, использующий измерения его координат относительно платформы, и не требующий численного дифференцирования этой информации.

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

1. Полученный в § 1.6 класс стабилизирующих обратных связей для аффинных управляемых систем недостаточно полно освещён в тексте работы, тогда как он представляет интерес с точки зрения задач механики.
2. В § 4.4 не поясняется, каким образом было подобрано движение мобильной платформы, измеренные характеристики которого использовались для идентификации параметров мобильного робота youBot.
3. Практически значимая в мобильной робототехнике задача погони заслуживает большего внимания и более детального рассмотрения, чем это сделано в рамках § 4.5.3.
4. В тексте диссертации используется большое количество обозначений, расшифровки которых уместнее было бы свести в один список.
5. В тексте работы и в автореферате присутствуют опечатки.

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы 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 законченной 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 неавтономных систем, теорию адаптивной идентификации. Автореферат достаточно полно и точно раскрывает содержание диссертации.

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

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник
учебно-научного центра интеллектуальной робототехники
отделения интеллектуальных систем в гуманитарной сфере
Российского государственного гуманитарного университета



Колесниченко Е. Ю.

Почтовый адрес: 125993, г. Москва, Миусская площадь, д.6
Телефон: +7(495) 250-63-29, +7 (495) 250 - 64 – 83
Электронная почта: decstrela@mail.ru

Дата составления отзыва:

21 ноября 2016 г.

Подпись Колесниченко Е.Ю. заверяю

Проректор по научной работе

О.В. Павленко

