

На правах рукописи



До Тянь Занг

**АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ЭКСОСКЕЛЕТА**

Специальность: 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы

(технические науки)

17 МАЙ 2017

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017



Работа выполнена на кафедре систем автоматического управления Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель

**Гаврилов Сергей Викторович**  
кандидат технических наук, доцент  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ» им.  
В.И. Ульянова (Ленина), доцент  
кафедры систем автоматического управления

Официальные оппоненты:

**Осипов Олег Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
Национальный исследовательский университет  
«МЭИ», профессор кафедры  
Автоматизированного электропривода,

**Лукичев Дмитрий Вячеславович**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
Электротехники и Прецизионных  
Электромеханических Систем ФГБОУ ВПО  
«Санкт-Петербургский национальный  
исследовательский университет  
информационных технологий, механики и  
оптики»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»,  
г. Санкт - Петербург

Защита состоится « 28 » июня 2017г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд.8203

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и на сайте [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru)

Автореферат разослан «27 » апреля 2017 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета



Белов М.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Прикладная задача построения управления приводами экзоскелетов встречается во целом ряде областей деятельности человека, например, в робототехнике, на транспорте, в медицине. Как правило, в экзоскелетах для обеспечения движения по каждой степени подвижности используется отдельный управляемый электропривод. Существует весьма ограниченный ряд подходов, используемых при изучении динамики движения экзоскелетов и построении управления ими. Работы в этой области велись и ведутся российскими и зарубежными учеными и инженерами, в их числе В.В. Белецкий, А.М. Формальский, М. Вукобратович, В.Е. Бербюк, А.В. Борисов, И.В. Новожилов, М.Ф. Зацепин, А.Ф. Смалок, А.В. Чигарев, P. Romilly, A. Kulpe, W. Grand, Hugh Herr, Herman Van der Kooij.

Практически все немногие известные результаты получены при рассмотрении экзоскелетов как электромеханических систем, когда модели динамики механической и электроприводной частей строятся отдельно, а затем объединяются в одну электромеханическую систему. Или, если строятся совместно, то при таких допущениях, которые практически сводят на нет взаимовлияние электрической и механической подсистем. Соответственно, и управление приводами экзоскелетов строится с ограниченным учетом отмеченного взаимовлияния механического и электрического процессов. Отметим, что применение в электроприводах экзоскелетов современных электрических двигателей, например, вентильных с постоянными магнитами, только усиливает взаимосвязанность механических и электромагнитных процессов.

Вышеотмеченные особенности приводят к необходимости совместного решения задач построения высокоточной математической модели динамики движения экзоскелета, учитывающей взаимовлияние электрической и механической подсистем, и синтеза управления электроприводами экзоскелета, основанными на адаптивном подходе.

Применению адаптивного подхода к управлению динамическими объектами посвящены труды отечественных и зарубежных учёных, таких как Андриевский Б.Р., Борцов Ю.А., Воронов А.А., Вукобратович М.А., Красовский А.А., Кирчански Н., Мирошник И.В., Овсепян Ф.А., Путов В.В., Поляхов Н.Д., Рутковский В.Ю., Тимофеев А.В., Терехов В.М., Тюкин И.А., Уткин В.И., Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Цыпкин Я.З., Шумский В.М., Шрамко Л.С., Якубович В.А., Ядыкин И.Б., Annaswamy A.M., Ercberger H., Fu K.,

Goldberg D., Gonsales R., Lindorff D., Li W., Ljung T., Li K., Landau T.D., Naracndra K.S., Ortega R., Slotine J.-J.E., Stocich D., Tang Y., Valavani L.S. и многих других.

Целью диссертационной работы является разработка адаптивного управления электроприводами экзоскелета, которое обеспечивает движение экзоскелета с требуемой точностью при наличии взаимосвязанной динамики движений по степеням подвижности и зависимости электромагнитных процессов в электроприводах от механических координат экзоскелета.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

1. Анализ существующих научно-технических разработок в области движения активных экзоскелетов и подробных им объектов - двуногих шагающих роботов.

2. Разработка высокоточной математической модели динамики движения экзоскелета как мехатронного многозвездного объекта с учетом взаимозависимости электромагнитных и механических процессов.

3. Разработка структуры системы управления динамикой экзоскелета, сочетающей стандартные локальные регуляторы в электроприводах экзоскелета с общим компенсатором неидеальностей динамики.

4. Разработка адаптивного компенсатора динамики экзоскелета, построенного по структуре вычисляемого момента или адаптивной системы с эталонной моделью.

5. Проведение исследований динамики движения экзоскелета при учете зависимости электромагнитных процессов от механических координат, а также эффективности предложенной системы управления электроприводами экзоскелета с учетом особенностей биомеханики ходьбы человека.

**Объект исследования.** Непосредственным объектом исследования является активный экзоскелет для реабилитации человека с ограниченной подвижностью нижних конечностей. Экзоскелет состоит из пяти звеньев (корпус и две ноги), имеет пять степеней подвижности, движение по каждой из которых обеспечивается своим электрическим приводом на вентильном двигателе с постоянными магнитами.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач в работе применяется подход к экзоскелету как к мехатронному многозвездному объекту. Используются метод построения математических моделей динамики мехатронных объектов, основанный на уравнениях Лагранжа-Максвелла,

методы современной теории адаптивных систем автоматического управления и теории электропривода. Для компьютерного моделирования применен программный пакет MatLab (Simulink).

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель динамики движения экзоскелета с электроприводами на вентильных двигателях.
2. Способ построения математической модели динамики движения экзоскелета.
3. Структура системы управления динамикой экзоскелета.
4. Адаптивный компенсатор динамики экзоскелета.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Математическая модель динамики движения экзоскелета учитывает взаимосвязь динамики движений по степеням подвижности экзоскелета, зависимость электромагнитных процессов в электроприводах от механических координат, а также дискретность реализации управления электроприводами.
2. Способ построения математической модели динамики движения экзоскелета основан на компьютерной технологии построения математических моделей мехатронных многозвенных систем, позволяющей автоматизировать процесс получения расчетных выражений.
3. Структура системы управления динамикой экзоскелета состоит из локальных ПИ регуляторов и общего компенсатора, включенного в контуры тока электроприводов экзоскелета.
4. Адаптивный компенсатор динамики экзоскелета построен по структуре вычисленного момента с алгоритмами Ли-Слотина и использует полную модель механизма экзоскелета для вычисления управляющего момента.

**Практическая ценность новых научных результатов**

1. Математическая модель динамики движения экзоскелета дает возможность исследовать эффекты, характерные для мехатронных многозвенных систем.
2. Способ построения математической модели динамики движения позволяет формировать подробную математическую модель динамики в реальном времени.
3. Структура системы управления динамикой экзоскелета позволяет использовать стандартные методы настроек для локальных регуляторов электроприводов и добавлять корректирующий сигнал адаптивного компенсатора без нарушения структуры и настроек локального управления.

4. Адаптивный компенсатор повышает качество движения экзоскелета за счет компенсации влияния взаимосвязей динамики движений по степеням подвижности экзоскелета и зависимости электромагнитных процессов от механических координат, а также придаст движению экзоскелета робастность к действию возмущений.

**Достоверность научных и практических результатов.** Достоверность подтверждается корректным использованием методов исследований, применением современных компьютерных средств и программ расчетов, конкретными результатами компьютерного моделирования динамики движения различных примеров экзоскелетов, не противоречащих опубликованным результатам, полученным другими авторами, а также апробацией основных научных результатов на научно-технических конференциях, опубликованием статей, содержащих результаты работы, в научных реферируемых журналах.

**Реализация результатов работы.** Практическая полезность подтверждается актом об использовании в учебном процессе СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

**Апробация результатов работы.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- XIX международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2016), Россия, Санкт – Петербург, 25-27 мая 2016.
- II международная научно-техническая конференция «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике», Россия, Пермь, 21-22 апреля 2016.
- XX международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2017), Россия, Санкт – Петербург, 24-26 мая 2017.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 2 статьи и 3 работы в материалах международных и межрегиональных конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 142 с., в том числе 118 с. основного текста, 58 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 109 наименований и приложение на 3 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определён ряд решаемых задач, сформулированы цели, задачи работы, научные положения, выносимые на защиту и структура диссертационной работы.

**В первой главе** приводится описание области применения экзоскелетов, результатов исследований движения экзоскелетов, представлены аналитический обзор основных подходов к построению математических моделей динамики экзоскелетов, а также отмечены ограниченность имеющихся результатов и актуальные задачи исследования динамики движения экзоскелетов как мехатронных многозвенных систем. Учет влияния приводных систем на динамические характеристики многозвенных механизмов практически не отражен в научной литературе и требует исследования.

Отмечено, что современный экзоскелет является многозвенной мехатронной системой с тремя основными составляющими: электромеханической, электронной и компьютерной, которые связаны энергетическими и информационными потоками. В то же время, эффективность существующих моделей динамики движения экзоскелетов ограничена электромеханическим подходом, который не учитывает ряд факторов, таких, как динамическое взаимовлияние движений по степеням подвижности, взаимодействие электромагнитных и механических процессов, дискретность реализации управления.

Для разработки высокоточной модели динамики движения экзоскелета предлагается рассматривать экзоскелет как многозвенный мехатронный объект и применять имеющиеся на сегодня технологии исследования и построения подобных систем. Предложен подход к построению высокоточной модели динамики движения экзоскелета, которая используется не только для анализа движений, но и при решении задачи построения эффективного управления электроприводами экзоскелета. При этом управление электроприводами предлагается строить с максимально возможным учетом динамических взаимосвязей механической конструкции экзоскелета.

**Во второй главе.** Рассмотрен процесс построения высокоточной модели динамики экзоскелетов с отдельными электроприводами для обеспечения движения по каждой степени подвижности.

Электромеханический подход не отражает богатства связей между механическими и электромагнитными процессами в экзоскелетах и, как следствие, ведет к потере информации, которая может быть существенной для

современных и перспективных экзоскелетов. В отличие от указанного, предлагаемый подход базируется на основе уравнений Лагранжа-Максвелла и позволяет учитывать динамические преобразования энергии без потери информации.

Определим функцию Лагранжа-Максвелла:

$$\mathcal{L}(q_i^M, \dot{q}_i^M, q_i^{\mathcal{Q}}, \dot{q}_i^{\mathcal{Q}}) = T(q_i^M, \dot{q}_i^M) - P(q_i^M) + W_{\Sigma M}(q_i^M, \dot{q}_i^{\mathcal{Q}}) - W_{\Sigma \mathcal{Q}}(q_i^M, \dot{q}_i^{\mathcal{Q}}),$$

где:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \left( \frac{m_i v_{ci}^2}{2} + \frac{J_i (\dot{q}_i^M)^2}{2} \right) - \text{кинетическая энергия};$$

$$P = \sum_{i=1}^n P_i = \sum_{i=1}^n m_i g y_{ci} \quad P - \text{потенциальная энергия};$$

$$W_{\Sigma M}(q_i^M, \dot{q}_i^{\mathcal{Q}}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^n L_{kr} (q^M) i_k i_r \quad - \quad \text{электромагнитная энергия}$$

приводов;

$$W_{\Sigma \mathcal{Q}}(q_i^M, \dot{q}_i^{\mathcal{Q}}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \frac{(q_k^{\mathcal{Q}})^2}{C_k (q^M)} - \text{энергия электрического поля}.$$

Тогда уравнения Лагранжа-Максвелла для  $n$  механических звеньев и  $n$  электрических контуров можно записать в виде:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i^M} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i^M} + \frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial \dot{q}_i^M} = Q_i (i = 1, \dots, n)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_k^{\mathcal{Q}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_k^{\mathcal{Q}}} + \frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial \dot{q}_k^{\mathcal{Q}}} = Q_k (k = n+1, \dots, 2n)$$

В многозвенных системах действуют силы  $Q_i^*$ , которые возникают из-за действия электрических и магнитных полей на звенья и приводят их в движение:

$$Q_j^* = \frac{\partial W_{\Sigma M}(q^M)}{\partial q_j^M} - \frac{\partial W_{\Sigma \mathcal{Q}}(q^M)}{\partial q_j^M} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^n \frac{\partial L_{kr}(q^M)}{\partial q_j^M} i_k i_r + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{r=1}^n \frac{\partial C_k(q^M)}{\partial q_j^M} \frac{e_k^2}{C_k^2}.$$

Уравнения Лагранжа-Максвелла с действующими силами  $Q_j^*$  не могут быть непосредственно использованы в стандартных процедурах компьютерного решения систем дифференциальных уравнений, поскольку требуют предварительного выполнения операций дифференцирования. Выполнение этих операций вручную для экзоскелетов, обладающих пятью степенями



подвижности, представляет чрезвычайно трудоемкую задачу, а конечная явная форма уравнений динамики настолько громоздка, что практически недоступна для анализа. В связи с этим, в работе предлагается использовать специальную компьютерно-ориентированную процедуру формирования математической модели динамики движения экзоскелета, которую можно кратко представить в виде 5 этапов:

*Этап 1.* Выбор обобщенных механических координат  $q_i^M$ , однозначно определяющих положение звеньев механической конструкции, и электрических обобщенных координат, в качестве которых можно выбрать электрические заряды.

*Этап 2.* Вычисление кинетической, потенциальной, магнитной и электрической энергий системы и составление функции Лагранжа-Максвелла для электромеханической системы.

*Этап 3.* Вычисление диссипативной функции как алгебраической суммы механической и электрической диссипативных функций.

*Этап 4.* Нахождение выражения для обобщенных неконсервативных сил.

*Этап 5.* Вместо выполнения операций дифференцирования функции Лагранжа-Максвелла и диссипативной функции для получения расчетных дифференциальных уравнений используем специальную компьютерно-ориентированную процедуру непосредственного вычисления элементов матриц уравнений движения.

При построении модели динамики движения экзоскелета необходимо учитывать неидеальность характеристик его электродвигателей. В первую очередь, к таким неидеальностям в явнополюсных вентильных двигателях относится изменение параметров взаимной индуктивности  $L$  ротора и статора в зависимости от их взаимного углового положения  $q_i^M$ . В нашем случае эту зависимость представим таким образом:

$$L(q_i^M) = L_0 + K_L L_0 \cos(q_i^{ПЗ}),$$

где  $q_i^{ПЗ}$  – электрический угол поворота двигателя (с учетом количества пар полюсов).

Изменение индуктивности приводит, в дополнение к алгоритму управления, к изменению электромагнитного момента привода  $M_i$ . Эта зависимость может быть фактором, существенно влияющим на эффективность управления, поэтому должна быть учтена в выражении для момента  $i$ -го двигателя:

$$M_i^H(L(q_i^M)) = J_{\Sigma}^i \frac{d\omega_i}{dt} + M_c + M_{взаи}(q_i^M, \dot{q}_i^M, \ddot{q}_i^M),$$

где:  $M_c$  - момент сопротивления, например, момент вязкого трения;  $J_{\Sigma}^i \frac{d\omega}{dt}$  - суммарный динамический момент  $i$ -го звена;  $J_{\Sigma}^i$  - суммарный момент инерции  $i$ -го двигателя и звена;  $M_{взаи}(q_i^M, \dot{q}_i^M, \ddot{q}_i^M)$  - момент, определяющий динамическое влияние от других звеньев;  $M_i^H(L(q_i^M))$  - электромагнитный момент  $i$ -го двигателя.

В третьей главе на основе анализа биомеханики ходьбы человека представлены результаты построения кинематической и динамической моделей движения экзоскелета.

Ходьба человека состоит из двух основных фаз: одноопорной и двухопорной. Формирование этих фаз для модели экзоскелета осуществляется на основе желаемых поз с их динамическими особенностями. Для формирования одноопорной фазы в момент  $t = t_i$  положение опорной ноги определено координатами  $[a_i(t_i), b_i(t_i)]$  и высота точки  $A_2$  переносимой ноги  $\Delta h(t_i)$ . Остальные координаты переносимой ноги находятся следующим образом: строятся две окружности с центрами  $O_2, A_2$  и радиусами  $l_a, l_b$  соответственно. Тогда точки пересечения этих окружностей определяют возможные положения голени переносимой ноги (рис.1.а). Формирование двухопорной фазы совершается аналогично (рис.1.б).

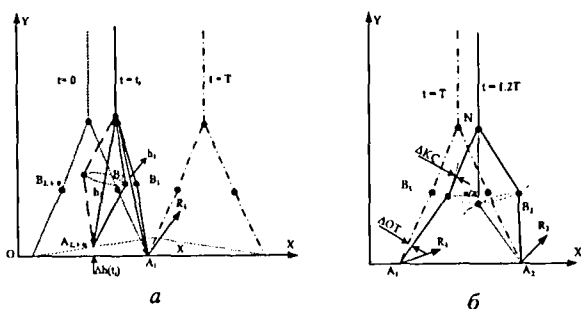


Рис.1

Определение функций движения звеньев экзоскелета выполнено интерполированием с базисными функциями:  $F(t, a_1, a_2) = a_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(\omega t)$ , где:  $\omega = 2\pi/T$  - для одноопорной фазы и  $\omega = 2\pi/0.2T$  - для двухопорной фазы.

Силы реакции определяются из формул:

$$M\ddot{x}_c = M\ddot{x} - m_k r_k \sin \Psi + \sum_{j=1}^2 (m_a r_a \sin \alpha_j + m_b r_b \sin \beta_j);$$

$$M\ddot{y}_c = M\ddot{y} - m_k r_k \cos \Psi - \sum_{j=1}^2 (m_a r_a \cos \alpha_j + m_b r_b \cos \beta_j);$$

Составляющие сил реакции опоры:

$$M\ddot{x}_c = R_{1x} + R_{2x}$$

$$M\ddot{y}_c = R_{1y} + R_{2y} - Mg$$

здесь:  $x, y$  - декартовы координаты точки подвеса ног;  $M$  - масса экзоскелета;  $R_{jx}, R_{jy}$  - продольная и вертикальная составляющие сил реакции опоры для  $j$ -й ноги.

Получены результаты формирования одного полного шага экзоскелета, состоящего из двух последовательных компонентов - одноопорной и двухопорной фаз (рис.2 а), и графики составляющих сил реакции опоры (рис.2 б). Полученные значения сил реакции опоры при движении экзоскелета несколько отличаются от имеющихся экспериментально полученных результатов для ходьбы человека, что объясняется особенностью работы мышц человека во время движения. Однако эти отличия незначительны для формирования программного движения пятистепенного экзоскелета.

Разработанные кинематическая и динамическая модели движения экзоскелета позволяют сформировать желаемое движение и разработать систему управления электроприводами экзоскелета для обеспечения требуемых динамических характеристик.

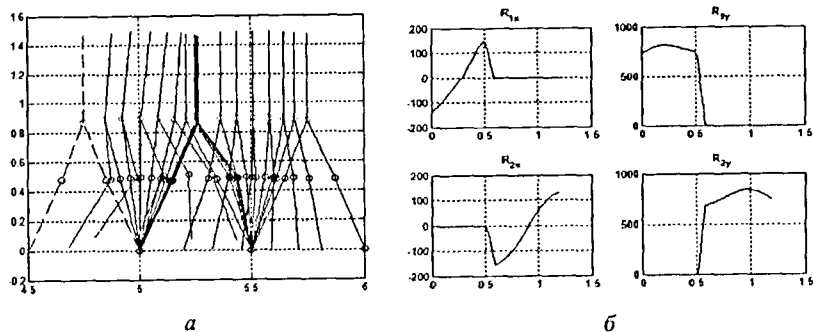


Рис.2

В четвертой главе представлены результаты исследования особенностей динамики движения экзоскелета и эффективности адаптивного управления электроприводами экзоскелета.

Применение в электроприводах экзоскелетов явнополусных вентильных двигателей (рис. 3 а) без специальных средств коррекции может приводить к биениям электромагнитного момента из-за зависимости взаимной индуктивности  $L$  ротора и статора от их взаимного углового положения  $q_i^M$  (рис. 3 б).

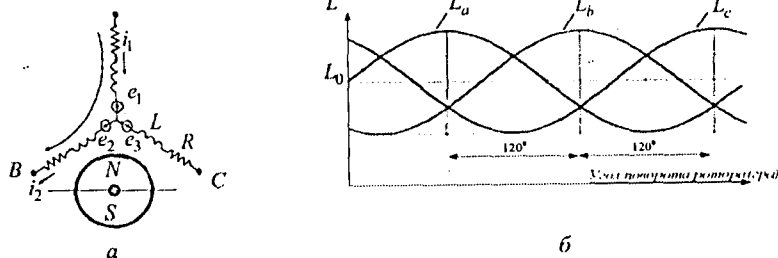
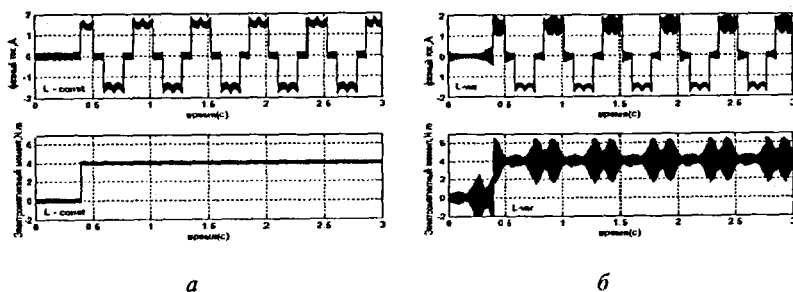


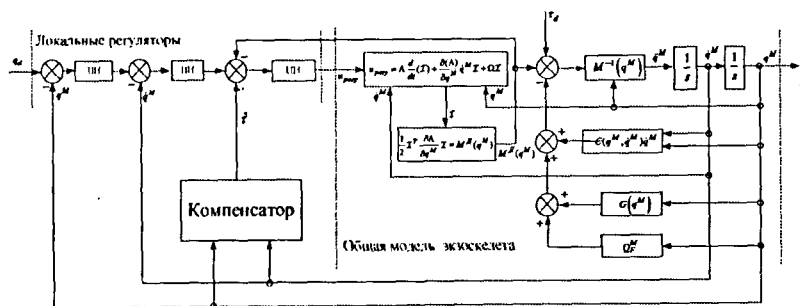
Рис.3

Результаты исследования показали, что в вентильном электроприводе колебания тока статора и биения электромагнитного момента имеют недопустимо высокий уровень (рис.4). Этот факт затрудняет использование высокомоментных низкочастотных двигателей с постоянными магнитами в безредукторных приводах многих механизмов, несмотря на очевидные достоинства таких приводов.



Показано, что использование только локальных литейных (ПИД) регуляторов в электроприводах экзоскелета не обеспечивает требуемого качества движения из-за сложного (сразу по всем степеням подвижности) характера движения и наличия связи механических и электромагнитных процессов в электроприводах. Решение этой проблемы предлагается за счет применения более совершенной (и сложной) системы адаптивного управления.

Предложенная структура системы управления электроприводами экзоскелета с локальными ПИ регуляторами и адаптивным компенсатором представлена на рисунке (рис. 5).



Введение в контур тока вентильного двигателя адаптивного компенсатора, построенного по структуре с эталонной моделью (рис. 6 а), позволило уменьшить биеения электромагнитного момента практически на порядок (рис. 6 б). Обозначения на рисунке 6 а:  $W(s) = \frac{1}{L_{\phi s} + R_{\phi}}$  – передаточная функция

объекта управления;  $W_m(s) = \frac{1}{L_m s + R_m}$  – эталонная передаточная функция.

Целевая функция взята в виде:  $J(\alpha) = \frac{1}{2} \varepsilon^2$ ,  $\varepsilon = y_m - y$ , где  $y_m$  – токи эталонной модели;  $y$  – токи электропривода.

Адаптивный алгоритм имеет вид:  $\dot{\hat{\alpha}}_1 = -\gamma \varepsilon u$ ,  $\dot{\hat{\alpha}}_2 = \gamma \varepsilon y_m$ , где  $\gamma$  – коэффициент адаптации. Управляющий сигнал сформирован таким образом:  $u_c = \hat{\alpha}_1 u - \hat{\alpha}_2 y_m$ ,  $\alpha_{10} = 0$ ,  $\alpha_{20} = 0$ .

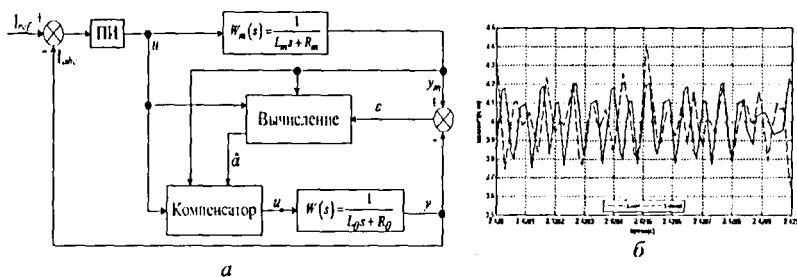


Рис.6

Дальнейшее развитие системы управления электроприводами экзоскелета проведено путем применения адаптивного компенсатора с вычислением момента сил и настройкой на основе алгоритмов Ли-Слотина. При этом вычисление моментов производится на основе полной модели динамики механизма с помощью компьютерной процедуры формирования модели, рассмотренной в главе 2. Структура адаптивного компенсатора представлена на рис. 7. Обозначения:  $a$  – вектор порядка  $m \times 1$ , содержит  $m$  неизвестных параметров механической конструкции экзоскелета;  $q_d$  – вектор заданных траекторий;  $\bar{q} = q - q_d$  – вектор ошибок по обобщенным координатам;  $\dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda \bar{q}$  и вектор  $s = \dot{q} - \dot{q}_r$ .

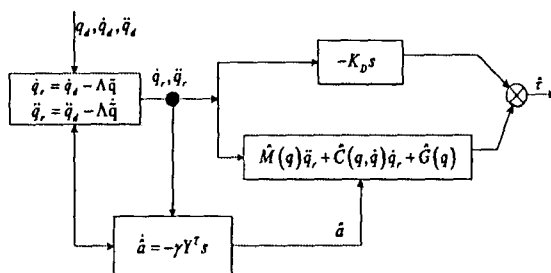


Рис.7

Уравнение модели динамики движения механической конструкции экзоскелета  $\hat{M}(q)\ddot{q}_r + \hat{C}(q, \dot{q})\dot{q}_r + \hat{G}(q) = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r)\hat{a}$ , где, в свою очередь,  $\hat{a}$  – оценки вектора  $a$ , а матрицы  $\hat{M}, \hat{C}, \hat{G}$  получены заменой вектора  $a$  на его оценку  $\hat{a}$ ;  $\gamma = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_m), \gamma_i > 0$ ;  $K_D = \text{diag}(k_1, \dots, k_n)$ ,  $k_i > 0$ ;  $\Lambda = \text{diag}(\Lambda_1, \dots, \Lambda_n), \Lambda_1 > 0$ . Алгоритм вычисления момента:  $\hat{\tau} = Y_{ЭМ}(q^M, \dot{q}^M, \ddot{q}_r^M)\hat{a} - K_D s$ .

Регуляризованный алгоритм параметрической настройки:  $\dot{\hat{a}} = -\gamma Y^T s - K_{Os}\hat{a}$ .

На рис. 8 приведены графики ошибок по координате и моментов электроприводов одной ноги экзоскелета для сравнения эффективности трех вариантов систем управления электроприводами экзоскелета:

1 - управление только с локальными ПИ регуляторами: регуляторы тока и положения построены на оптимум по модулю, а регулятор скорости - на симметричный оптимум;

2 - управление с локальными ПИ регуляторами и линейным ПД компенсатором;

3 - управление с локальными ПИ регуляторами и адаптивным компенсатором с вычислением момента сил и настройкой на основе алгоритмов Ли-Слотина.

Видно, что введение компенсатора в систему управления компенсирует практически полностью биения управляющего момента при движении ноги, что улучшает точность траекторного движения. Вместе с тем, важно отметить, что это повышение эффективности не приводит к росту управляющих моментов

(электромагнитных моментов приводов). В этом случае можно рекомендовать применять как линейные, так и адаптивные компенсаторы, так как показатели точности и затрат энергии примерно одинаковы, но линейный ПИД компенсатор с точки зрения инженерной реализации существенно проще по сравнению с адаптивным.

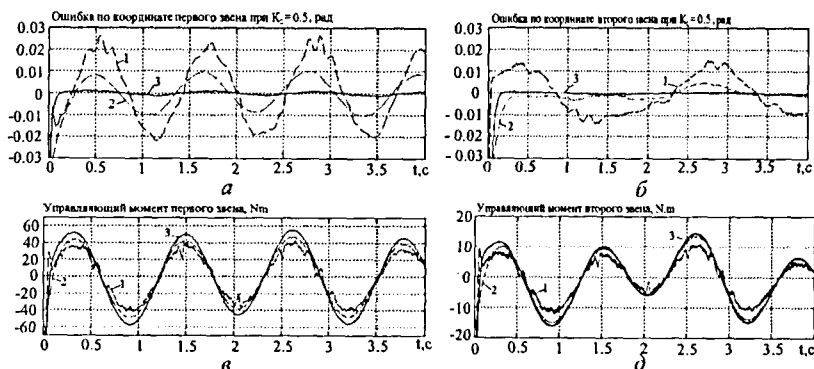


Рис.8

Однако картина меняется при переменных параметрах механизма экзоскелета и действии возмущений в процессе движения. На рис. 9 (кривая 1 соответствует линейному ПД компенсатору; кривая 2 – адаптивному компенсатору) показаны ошибки по координате звеньев ноги экзоскелета при изменении масс звеньев и действия возмущений.

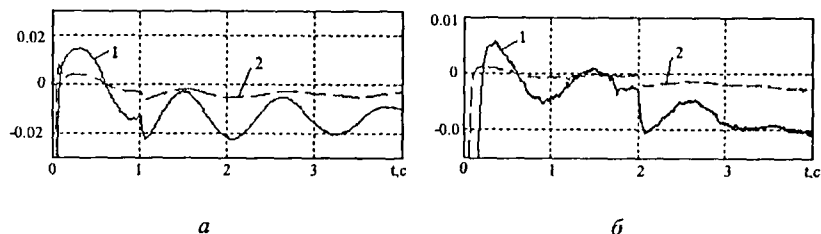


Рис.9

Применение адаптивного компенсатора с вычислением момента сил и настройкой на основе алгоритмов Ли-Слотина обеспечивает заметно лучшее качество управления по сравнению с линейным ПД компенсатором. Оценка средней точности процессов управления (на основе интеграла разности мгновенного значения реального положения и желаемой траектории) в случае



адаптивного компенсатора в 5 раз выше, чем с ПД компенсатором, при этом электромагнитный момент выше всего на 15%.

Проведенные исследования разработанной адаптивной системы управления электроприводами на полном шаге экзоскелета показывают, что она способна обеспечить точность движения звеньев экзоскелета в пределах 1 углового градуса, что вполне достаточно для задач медицинской реабилитации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В соответствии с поставленными в диссертационной работе целью и задачами, проведено теоретическое исследование и выполнено математическое моделирование.

Рассмотрены теоретические и практические вопросы динамики движения экзоскелетов и биомеханики ходьбы человека. Получена математическая модель динамики движения экзоскелета как мехатронного многозвennого объекта с учетом взаимозависимости электромагнитных и механических процессов и дискретности реализации управления, позволяющая проводить анализ особенностей движения, подобного ходьбе человека, и строить управление электроприводами таких объектов.

Построена система управления электроприводами экзоскелета с локальными ПИ регуляторами и общим адаптивным компенсатором, реализованным по структуре вычисленного момента с алгоритмами настройки Ли-Слотина и по упрощенной структуре адаптивной системы с эталонной моделью и параметрической адаптацией. Для формирования управляющего момента в адаптивном компенсаторе использована полная математическая модель динамики движения экзоскелета, матрицы которой вычисляются по специальной процедуре на каждом шаге расчета.

Исследована эффективность построенной системы управления движением экзоскелета в условиях зависимости электромагнитных процессов от механических координат и действия внешних возмущений. Представлены результаты исследования динамики экзоскелета при движении, соответствующем ходьбе человека. Проведен анализ эффективности

предложенной системы управления электроприводами экзоскелета с локальными ПИ регуляторами и адаптивным компенсатором.

Показано, что предложенная система управления электроприводами обеспечивает точность и плавность движения звеньев экзоскелета в пределах, требующихся в задачах медицинской реабилитации.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гаврилов С.В., Занг Д.Т., Управление электроприводом на основе бесколлекторного двигателя с постоянными магнитами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: 2016. – Вып.8. – С.53-62.
2. Гаврилов С.В., Занг Д.Т., Особенности динамики экзоскелетов с вентильными двигателями с постоянными магнитами // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб.: 2017. – Вып.4. – С.34-41.

В других изданиях:

3. Гаврилов С.В., Занг Д.Т., Компьютерное моделирование динамики движения пятистепенного шагающего робота // Материалы II международной научно-технической конференции «Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике», Пермь, Апрель, 2016. – С. 72-76.
4. Гаврилов С.В., Занг Д.Т., построение высокоточной модели движения шагающего робота// SCM Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, СПб, 25-27 Мая, 2016. – С. 321-323. (The proceedings of the XVIII International conference on soft computing and measurements SCM 2016, Saint Petersburg, May 25-27, 2016. – 2016. – P. 321-323).
5. Гаврилов С.В., Занг Д.Т., Адаптивное управление электроприводами экзоскелета // SCM Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, СПб, Май, 2017 (в печати).