

На правах рукописи

Кузнецов Андрей Владимирович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РУЛЕВЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт - Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт – Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор Н. Д. Поляхов

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор В. М. Шестаков
доктор технических наук Ю. Г. Оболенский

Ведущая организация – Инженерный центр им. А.С. Яковлева
открытого акционерного общества «Научно-производственная корпорация «Иркут»

Защита состоится " _____ " _____ 2011 г. в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт - Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " _____ " _____ 2011 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских и
кандидатских диссертаций

Белов М.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В основе формирования требований к рулевым системам самолета лежит необходимость обеспечения его управляемости и устойчивости во всех эксплуатационных режимах. Появление самолетов с неустойчивой аэродинамической компоновкой еще больше усилило требования к динамической точности электрогидравлических следящих рулевых систем. Эти системы должны обеспечивать эффективное управление различными органами управления полётом самолёта и его устойчивость в области малых сигналов.

В области малого сигнала существует ряд факторов, которые не только снижают динамические и статические характеристики системы, но не позволяют выполнить основных требований, предъявляемых к электрогидравлическим рулевым системам самолета.

Сюда можно отнести существенные нелинейности и нестационарность характеристик линейного электродвигателя (ЛЭД) и золотниковых гидрораспределителей. Особенности этих нелинейных характеристик определяются, главным образом, областью нечувствительности и различными значениями крутизны статических характеристик в зависимости от величины входного сигнала.

Изменение параметров электрогидравлической системы преимущественно обусловлено изменением температуры и давления нагнетания рабочей жидкости, уменьшением числа резервированных каналов управления, а также изменением внешних условий и характеристик привода в процессе эксплуатации. Динамические характеристики системы в этом случае могут изменяться в широких пределах.

Возбуждение автоколебаний несущих поверхностей самолета недопустимо больших уровней возникают также, когда электрогидравлические системы, установленные на упругом основании и управляющие рулевыми инерционными органами через упругие конструктивные элементы, обладают низкими демпфирующими свойствами.

Эффективным средством решения указанных задач и достижения цели управления является применение адаптивных законов управления, уже зарекомендовавших себя в электромеханических системах.

Целесообразность адаптивного подхода заключается не только в повышении точности и качества функционирования локальных систем, но обеспечении необходимого демпфирования упругой электрогидравлической рулевой системе и повышении ее надежности.

Цели и задачи исследований. Целью диссертационной работы является разработка и исследование адаптивных регуляторов для авиационных электрогидравлических рулевых систем, обеспечивающих повышение динамической точности и стабилизацию характеристик следящего привода при изменении параметров, действия нелинейностей, упругости, внешних возмущений и нагрузки.

В диссертационной работе решаются задачи:

1. Разработка нелинейной математической модели ЛЭД с учетом конструктивных особенностей и магнитной цепи электродвигателя. Приведение нелинейного описания ЛЭД к виду, позволяющему упростить синтез адаптивного регулятора внутреннего контура сервопривода.
2. Синтез модифицированного сигнального адаптивного алгоритма с моделью для электрогидравлической следящей системы с линейным двигателем.
3. Разработка математической модели электрогидравлической рулевой системы с инерционной нагрузкой и упругими связями, пригодной для синтеза реализуемого адаптивного регулятора. Обоснование демпфирования упругих колебаний рулевого привода и нагрузки при коррекции внешнего контура по упругой силе и ее производной.

4. Синтез адаптивного регулятора с настраиваемой по возмущению моделью для электрогидравлической рулевой системы с инерционной нагрузкой и упругими связями для подавления колебаний рулевого привода и нагрузки.
5. Синтез адаптивного регулятора с редуцированной настраиваемой моделью для электрогидравлической рулевой системы с инерционной нагрузкой и упругими связями.
6. Математическое моделирование нестационарной, нелинейной двухконтурной адаптивной рулевой системы с учетом влияния упругости и цифровой реализации законов управления.

Объект исследования – авиационные электрогидравлические рулевые системы.

Предмет исследования – электрогидравлические рулевые системы с нелинейным описанием ЛЭД и адаптивными алгоритмами управления; электрогидравлические рулевые системы с упругими связями с инерционной нагрузкой и адаптивными алгоритмами подавления упругих колебаний.

Методы исследований. При решении поставленных задач диссертационной работы использован комплексный подход к построению и исследованию электромеханических систем, включающий методы современной теории автоматического управления, теории гидравлических и электрических приводов, а также методы математического и полунатурного моделирования динамических систем с использованием современных средств компьютерной техники.

Научные результаты. На защиту выносятся следующие научные результаты:

1. Нелинейная математическая модель линейного электродвигателя.
2. Модифицированный сигнальный адаптивный алгоритм с моделью для электрогидропривода с ЛЭД.
3. Математическая модель электрогидравлической рулевой системы с инерционной нагрузкой и упругими связями для синтеза адаптивного управления.
4. Модально адаптивный регулятор с настраиваемой моделью для подавления упругих колебаний рулевой системы.
5. Модально адаптивный регулятор с редуцированным настраиваемым идентификатором упругой силы для подавления упругих колебаний рулевой системы.

Научная новизна:

1. Математическая модель ЛЭД, составленная с учетом параметров магнитной цепи, включает в себя нелинейные характеристики, полученные аналитическим методом, в отличие от имеющейся линейной модели, содержащей нелинейную характеристику двигателя, полученную эмпирическим путем.
2. Модифицированный адаптивный регулятор с моделью и сигнальной настройкой, отличается от существующих, наличием введенных нелинейных блоков ограничения в контур модели, контур настройки модели, а также по выходному адаптивному сигналу.
3. Математическую модель электрогидравлической рулевой системы с инерционной нагрузкой и упругими связями отличает от полной модели ее обоснованное редуцирование до вида, пригодного для синтеза реализуемого адаптивного регулятора.
4. Адаптивный регулятор с идентификатором состояния рулевого привода с упругой нагрузкой, в котором корректирующее воздействие производится не по полному вектору переменных состояния, а только по упругой силе и ее производной, а также наличием сигнальной подстройки идентификатора по возмущению со стороны нагрузки. В отличие от режекторных фильтров, подавление упругих колебаний осуществляется не только в рулевом приводе, но и в нагрузке.

5. Редуцированный идентификатор упругой силы с сигнальной настройкой для подавления упругих колебаний рулевой системы, на основе редуцированной модели описания рулевой системы с нагрузкой. Применение редуцированного идентификатора с сигнальной подстройкой позволяет сразу получить требуемое выражение оценки упругой силы из структуры наблюдателя, что исключает операцию дифференцирования перемещения поршня.

Практическая значимость. Предложенные в работе адаптивные регуляторы были использованы при разработке цифровых алгоритмов управления для электрогидравлического привода СПМ-6П объекта СУ-35.

Эффективность применения адаптивных регуляторов, особенно на малых сигналах управления, а также при действии внешней нагрузки, подтверждена многочисленными стендовыми испытаниями на заводских образцах рулевых приводов.

Рекомендации по расчету и настройке адаптивных регуляторов включены в заводские методики проведения стендовых испытаний привода СПМ-50 с двухконтурной схемой адаптивного управления на предприятии ОАО «ПМЗ ВОСХОД».

На предприятии ОАО «ПМЗ ВОСХОД» проводится подготовка лабораторного комплекта рулевого привода с пультом управления для проведения испытаний привода с упруго массовой нагрузкой и предлагаемым в работе адаптивным регулятором.

Апробация работы.

Материалы диссертации докладывались на научных семинарах и конференциях, в частности, на:

- IX международном симпозиуме «Новые рубежи авиационных технологий XXI века», г. Жуковский, 19-23 августа 2007г,
- Международной научно-технической конференции «Мехатроника, автоматизация, управление – 2007», (ИКТМ-2007), п. Дивноморское, 24-29 сентября 2007г,
- VI Международной (XVII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП – 2010», Тульский государственный университет, г. Тула, 28 сент.- 1 окт. 2010 г,

а также изложены в НИР: «Исследование различных архитектур системы комбинированного управления гидростатическим объемным приводом» – САУ-247 между СПбГЭТУ «ЛЭТИ» и ОАО «ПМЗ ВОСХОД» г. Павлово Новгородской области, январь 2006 -2007 г.г; в отчетах НИР по проекту «Создание механотронных комплексов управления движением маневренных самолетов» в соответствии с гос. контрактом №698 от 20.05.2010 при финансовой поддержке Минобразования и науки РФ по программе ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия №1.2.2.

Публикации.

Основные положения, теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 7 работах, среди которых 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных в действующем перечне ВАК, а также статьи в других изданиях – 1; докладов - 3.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Диссертация изложена на 117 страницах машинописного текста, включает 81 рисунок, 1 таблицу, 1 приложение и содержит список литературы из 72 наименований, среди которых 66 отечественных и 6 иностранных авторов.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи и методы исследования, научная новизна, практическая значимость, достоверность и апробация результатов диссертации. Дана характеристика публикаций, структуры и объема работы.

В первой главе проведен анализ технических решений построения перспективных электрогидравлических рулевых систем (с непосредственным управлением золотниковым гидрораспределителем при помощи линейного двигателя (ЛЭД)), их месте и роли в управлении полетом высокоманевренного самолета. Установлено что:

а) для увеличения надежности и большей «электрификации» рулевой системы часть гидравлических каскадов усиления заменена на линейный электродвигатель;

б) математическое описание ЛЭД нелинейно и аналитически не определено;

в) механические характеристики исполнительных механизмов гидропривода имеют нелинейные характеристики, определяющие нелинейные (с переменной крутизной) зависимости изменения скорости поршня;

г) при изменении режимов функционирования вследствие изменения давления нагнетания и температуры изменяются параметры и коэффициенты усиления контура управления сервопривода с ЛЭД, особенно в области малых входных сигналов (при амплитудах, соответствующих 0,1% от максимального уровня);

д) обеспечить требуемое качество регулирования электрогидравлической системы с учетом указанных условий ее работы возможно только при использовании адаптивных законов управления.

Проведен анализ работы электрогидравлической рулевой системы с инерционной нагрузкой и упругими связями, который выявил:

а) крутильные колебаний руля могут быть уменьшены в результате использования собственных свойств рулевых приводов,

б) собственного демпфирования рулевого привода имеющимися способами (антирезонансные фильтры в прямом тракте, жесткая и гибкая обратные связи по перепаду давления и т. д.) при действии внешнего возмущения на рулевые органы недостаточно;

в) при действии внешнего возмущения на рулевые органы требуется использование адаптивно-модального управления.

Вторая глава посвящена разработке и теоретическому анализу **математической модели** ЛЭД, схема конструкции которого изображена на рисунке 1, где обозначены: якорь 1, постоянные магниты (ПМ) 2, 3, полюсные наконечники 4, 5, обмотка управления (ОУ) 6, центрирующая пружина 7, шток 8, стакан 9 из магнитно-мягкого материала, воздушные зазоры 10,11.

Построение нелинейной модели ЛЭД проводилось с учетом:

- параметров магнитной цепи – сопротивлений воздушных зазоров R_{x1} , R_{x2} и сопротивлений ПМ $R_{m1} = R_{m2} = R_m$;

- принятых допущений (пренебрежения потоками рассеяния и сопротивлениями магнитно-мягких участков и нерабочих зазоров, однородности поля и линейности намагничивания);

- эквивалентной схемы замещения магнитной цепи (рисунок 2), а так же схемы замещения отдельно для потоков подмагничивания (Φ_{m1} , Φ_{m2} , Φ_m) от ПМ (рисунок 3а) и потоков (Φ_{y1} , Φ_{y2} , Φ_y) ОУ (рисунок 3б).

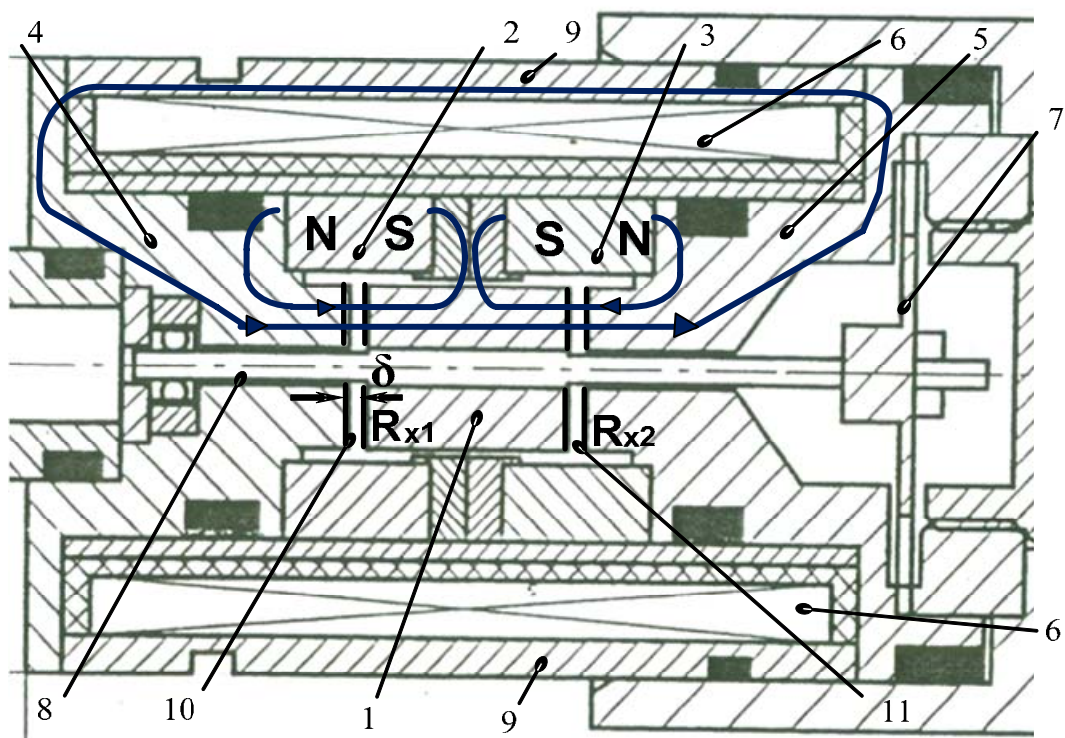


Рисунок 1–Схема конструкции линейного электродвигателя

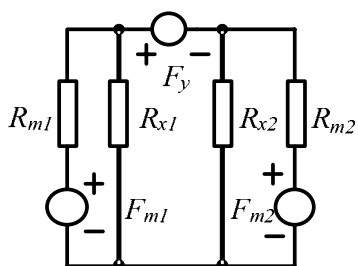


Рисунок 2– Схема замещения магнитной цепи

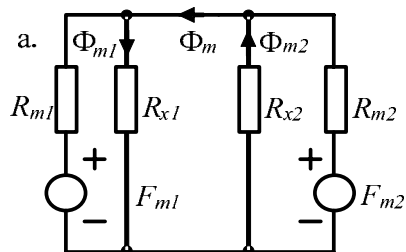
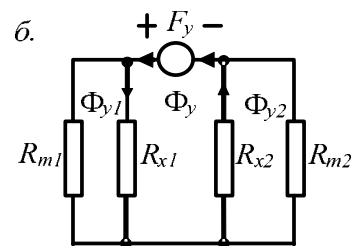


Рисунок 3 – Схемы замещения отдельно магнитной цепи а – для потоков подмагничивания, б – для потока управления



Основой разработанной нелинейной модели ЛЭД являются полученные в работе уравнения: электромагнитной силы, электрической цепи с учетом электромагнитной индукции и механическое уравнение движения.

Уравнение **электромагнитной силы ЛЭД**, полученное с использованием известного соотношения силы f через индукцию B в воздушном зазоре $f = -\frac{1}{2}\Phi^2 \frac{dR_M(x)}{dx} = -\frac{1}{2\mu_0 S_f} \Phi^2 = -\frac{1}{2} \frac{B^2 S_f}{\mu_0}$ по составленному уравнению электромагнитной

силы ЛЭД (для конструкции на рисунке 1) $f_{ЭМ} = \frac{S_f}{2\mu_0} [(B_{m1} + B_{y1})^2 - (B_{m2} - B_{y2})^2]$, имеет вид

$$f_{ЭМ} = \frac{(2\mu_0 S_f R_{x0}^2)^{-1}}{(\bar{R}_m + 1 - \bar{x}^2)^2} \left[2(\bar{R}_m + 1 + \bar{x}^2) F_m F_y + \left(\frac{4F_m^2}{\delta} + \frac{(\bar{R}_m + 1)F_y^2}{\delta} \right) \bar{x} \right], \quad (1)$$

где x - перемещения якоря, S_f - площадь воздушного зазора, $(R_M = x/\mu_0 S_f)$, R_M - магнитное сопротивление цепи, $(B_{m1} + B_{y1})$ - результирующая индукция (от действия МДС ПМ F_m и МДС ОУ F_y) в левом зазоре, $(B_{m2} - B_{y2})$ - результирующая индукция в

правом зазоре, R_{x_0} , δ – соответственно, сопротивление и величина воздушного зазора в среднем положении двигателя, $\bar{R}_m = R_m/R_{x_0}$, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Уравнение электрической цепи ЛЭД ($u = Ri + w \frac{d\Phi}{dt}$), полученное в работе с учетом результирующего магнитного потока $\Phi(F_y, x) = \Phi_m + \Phi_y$ через обмотку управления от всех источников: F_{m1}, F_{m2} (ПМ), где $F_{m1} = F_{m2} = F_m$ и F_y (ОУ), где $F_y = w i$, с использованием схемы замещения (рисунок 3), имеет вид

$$u = iR + L(F_y, \bar{x}) \frac{di}{dt} + C_e(F_y, \bar{x}) \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

где индуктивность цепи $L(F_y, \bar{x})$ и коэффициент ЭДС $C_e(F_y, \bar{x})$ определяется по формулам:

$$L(F_y, \bar{x}) = w^2 \frac{\partial \Phi}{\partial F_y} = \frac{w^2 [(\bar{R}_m + 1)^2 - \bar{x}^2]}{2\bar{R}_m(\bar{R}_m + 1 - \bar{x}^2)}, \quad (3)$$

$$C_e(F_y, \bar{x}) = w \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{w(\bar{R}_m + 1)F_y \bar{x} + wF_m(\bar{R}_m + 1 + \bar{x}^2)}{R_{x_0}(\bar{R}_m + 1 - \bar{x}^2)^2 \delta}. \quad (4)$$

Уравнение движения

$$f_{\text{ЭМ}} = m\ddot{x} + b\dot{x} + Cx + f_n, \quad (5)$$

где m – масса якоря и подвижной части ЛЭД, f_n – сила внешней нагрузки ЛЭД, C – жесткость центрирующей пружины, b – коэффициент вязкого трения.

Применимость математической модели ЛЭД в структуре электрогидравлической системы с жесткими связями с исполнительным механизмом основана на ряде предпосылок автора.

1. В качестве объектов модели ЛЭД рассматриваются только двигатели с постоянными магнитами, где максимальная МДС ОУ соотносится с МДС ПМ следующим образом $F_{y\max} = (1/6 \dots 1/10)F_m$.

2. Рассматриваются двигатели с величиной относительного магнитного сопротивления ПМ в пределах $\bar{R}_m = (7 \dots 10)$ (условие на конструктивные параметры: $R_m = \frac{l_m}{S_m \mu_m}$, $R_{x_0} = \frac{\delta}{\mu_0 S_f}$).

3. Рассматриваемые двигатели перемещаются в малом относительно нуля.

С учетом выполнения предпосылки 1 в выражении (4) первым слагаемым, содержащем МДС ОУ F_y допустимо пренебречь, после чего функциональная зависимость $C_e(F_y, \bar{x})$ примет вид

$$C_e(\bar{x}) = \frac{wF_m(\bar{R}_m + 1 + \bar{x}^2)}{R_{x_0}(\bar{R}_m + 1 - \bar{x}^2)^2 \delta}. \quad (6)$$

Выполнение предпосылки 1 позволяет упростить и выражение (1) для электромагнитной силы ЛЭД

$$f_{\text{ЭМ}} = \frac{(2\mu_0 S_f R_{x_0}^2)^{-1}}{(\bar{R}_m + 1 - \bar{x}^2)^2} \left[2(\bar{R}_m + 1 + \bar{x}^2)F_m F_y + \frac{4F_m^2 \bar{x}}{\delta} \right]. \quad (7)$$

Показано, что доля третьего слагаемого (\bar{F}_y^2) в формировании силы (1) составляет менее 10%.

При выполнении обеих предпосылок сразу, математическая модель ЛЭД принимает **линейное описание**, аналогичное случаю работы двигателя вблизи нуля ($x \rightarrow 0$).

$$\text{Уравнение силы: } f_{\text{ЭМ}} = k_y F_y + C_m x = k_{fi} i + C_m x,$$

$$\text{где } k_y = \frac{(\mu_0 S_f R_{x_0}^2)^{-1} F_m}{\bar{R}_m + 1}, \quad C_m = \frac{2(\mu_0 S_f R_{x_0}^2)^{-1} F_m^2}{(\bar{R}_m + 1)^2 \delta}.$$

$$\text{Уравнение электрической цепи: } u = iR + L_0 \frac{di}{dt} + C_{e0} \frac{dx}{dt},$$

$$\text{где } L_0 = \frac{w^2(\bar{R}_m+1)}{2R_m}; C_{e0} = \frac{F_m w}{R_{x0}(\bar{R}_m+1)\delta}.$$

$$\text{Уравнение движения: } f_{\text{ЭМ}} = m\ddot{x} + b\dot{x} + Cx + f_u.$$

В наиболее общем случае, т. е. при выполнении только предпосылки 1, математическая модель ЛЭД – **нелинейная**, определяемая уравнениями (2-3, 5-7).

Для определения формы нелинейной зависимости силы тяги ЛЭД f_T от тока управления в первом слагаемом в уравнения (7) в работе предлагается осуществить замену переменной \bar{x} на \bar{F}_y , при условии выполнения предпосылки 3. Тогда с учетом пропорциональности регулировочной характеристики $\bar{F}_y \equiv \bar{x}$ возможен переход к приближенному выражению силы тяги f_T ЛЭД

$$\bar{f}_T \approx \frac{F_m F_{y\max} (\bar{R}_m + 1 + \bar{F}_y^2) \bar{F}_y}{\mu_0 S_f R_{x0}^2 (\bar{R}_m + 1 - \bar{F}_y^2)^2}, \quad (8)$$

вид которой приводится на рисунке 4.

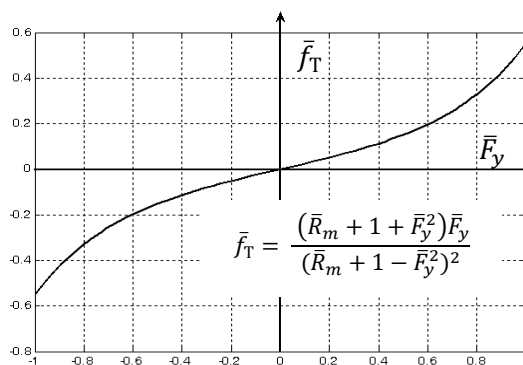


Рисунок 4 — Форма нелинейной зависимости силы тяги от тока управления ЛЭД

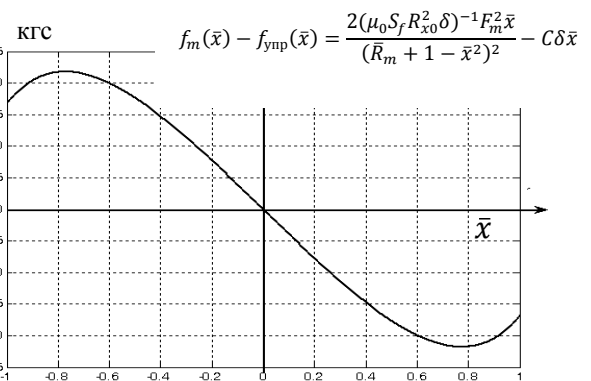


Рисунок 5 — Форма нелинейной зависимости результирующей силы упругости от перемещения ЛЭД

С учетом анализа жесткости C центрирующей механической пружины ЛЭД в работе проводится оценка формы нелинейной зависимости результирующей силы упругости магнитной и механической пружин

$$f_m - f_{\text{упр}} = \frac{2(\mu_0 S_f R_{x0}^2 \delta)^{-1} F_m^2 \bar{x}}{(\bar{R}_m + 1 - \bar{x}^2)^2} - C \delta \bar{x}, \quad (9)$$

показанной на рисунке 5.

В работе, согласно предпосылке 3, показывается, что нелинейная зависимость результирующей упругой силы ЛЭД, содержащей два экстремума, при достижении которых двигатель снижает статическую жесткость, заставляет сокращать величину перемещения x ЛЭД до величин, где отклонение от линейности нелинейной характеристики $f_m(\bar{x}) - f_{\text{упр}}(\bar{x})$ незначительно.

Для улучшения свойств модели – уменьшения влияния электромагнитной постоянной времени $T_{\text{ЭМ}} = L(\bar{x})/R$ ЛЭД и нелинейной обратной связи по ЭДС $C_e(\bar{x})$, в работе предлагается сформировать контур тока ЛЭД с ПИ - регулятором с соответствующими настройками.

В итоге проведенного аналитического исследования статических и динамических характеристик ЛЭД получена структурная схема нелинейной модели ЛЭД, представленная на рисунке 6.

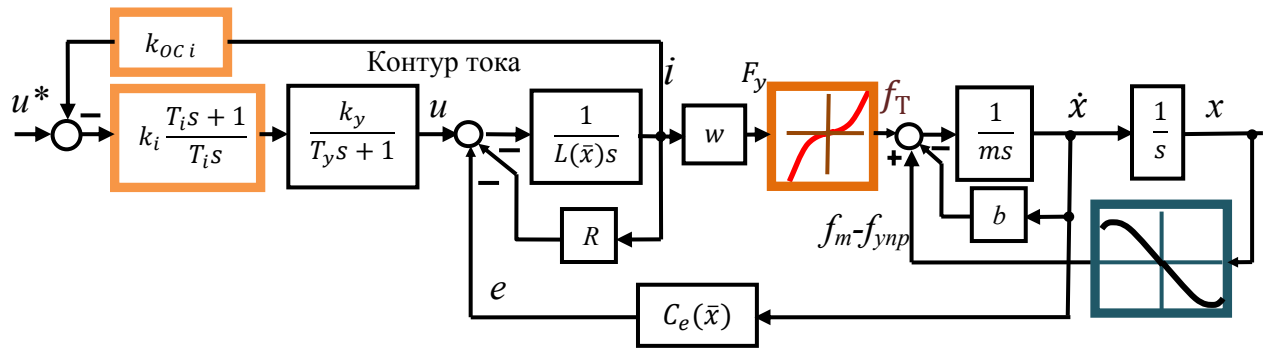


Рисунок 6 – Структурная схема нелинейная математическая модель ЛЭД

Уравнение ЛЭД с учетом введенных предпосылок и мероприятий по линеаризации его статических характеристик имеет вид

$$k_{fi}(\cdot)w i = m\ddot{x} + b\dot{x} + (c - C_m(\cdot))x, \quad (10)$$

где $k_{fi}(\cdot)$ – функциональная зависимость силы тяги ЛЭД по току управления (при практическом использовании) задается кусочно-линейной функцией, $C_m(\cdot)$ – функциональная зависимость магнитной жесткости пружины с учетом предпосылки 3 представляет собой константу.

Третья глава посвящена разработке, теоретическому анализу и реализации адаптивного регулятора с сигнальной настройкой для электрогидравлического привода с ЛЭД.

Для синтеза адаптивных регуляторов для внутреннего и внешнего контуров электрогидропривода выбрано математическое описание (рисунок 7) с учетом нестационарности параметров системы и нелинейностей, где $D(\cdot)$ – “функциональная добротность” как зависимость от режимных условий работы, $\tau(\cdot)$ – такая же “постоянная времени” ($T_{ЛЭД}$).

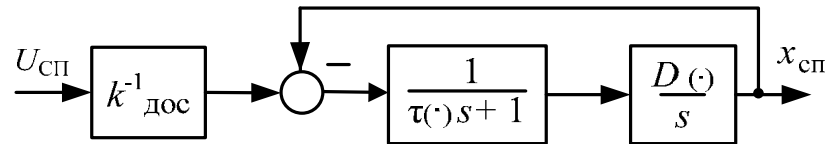


Рисунок 7– Модель контуров электрогидропривода.

С учетом допустимости перехода к модели, представленной на рисунке 8,

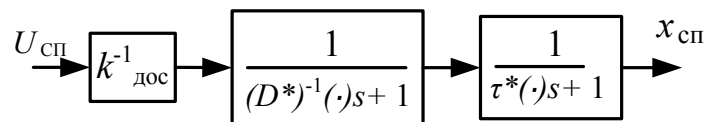


Рисунок 8– Модель объекта при учете влияния звена с малым параметром где D и D^* , а также τ и τ^* , соответственно, близкие величины, рассматривается синтез адаптивного регулятора при учете влияния звена с малым параметром τ .

$$\begin{cases} \dot{x} = -ax + bu, & u = g + z, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \tau \dot{\tilde{x}} = -\tilde{x} + x, \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_M = -a_M x_M + b_M g, \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} z = -h \operatorname{sign} b_M (\tilde{x} - x_M), \end{cases} \quad (14)$$

Проведенный синтез адаптивного регулятора с эталонной моделью (ЭМ) пониженной размерности для модели объекта управления (11), представленной на рисунке 8, где $a = a(x, t)$ и $b = b(x, t)$ локально ограниченные функции; τ – малый параметр малоинерционного звена (12) (с описанием в операторном виде $\tilde{x} = Fx, F = \frac{1}{\tau D_t + 1}, D_t = d/dt$); a_M и b_M – параметры эталонной модели (13), z – сигнальный адаптивный алгоритм (14), выявил диссипативность процессов адаптации. Это означает, что при условии влияния неучтенных звеньев параметр h адаптивного алгоритма (14)

является функцией $h(\tau)$, значения которой зависят от времени и изменяются по закону $(1 - e^{-(t-t_0)/\tau})$.

В этом случае для улучшения качества адаптации потребуется введение дифференциальной составляющей в сигнал адаптации.

Синтез адаптивного регулятора с настраиваемой моделью (НМ) (наблюдателем состояния пониженной размерности (17) - (18) для модели контура (15) с выделенной стационарной частью a_0, b_0 , и содержащего малоинерционное звено (16)), который описывается уравнениями

$$\dot{x} = -a_0x + b_0u + (a_0 - a)x + (b - b_0)u, \quad u = g + \mu, \quad (15)$$

$$\tau \dot{\tilde{x}} = -\tilde{x} + x, \quad \tilde{x} = Fx, F = \frac{1}{\tau D_t + 1}, D_t = d/dt, \quad (16)$$

$$\dot{\hat{x}} = -(a_0 + g_1)\hat{x} + g_1\tilde{x} + b_0u + b_0z, \quad (17)$$

$$z = h \operatorname{sign} b_0 (\tilde{x} - \hat{x}), \mu = -b_0^{-1} F_f F^{-1} z, F_f = (T_f D_t + 1)^{-1}, F^{-1} = \tau D_t + 1, \quad (18)$$

позволил сделать следующие выводы.

- Адаптивная система (15) – (18) по управлению (адаптации) диссипативна,
- Адаптивный механизм (по μ) содержит оператор дифференцирование $F^{-1} = \tau D_t + 1$ в случае невозможности пренебрежения параметром τ .

Учитывая приведенные выводы, в работе разработана структура модифицированного адаптивного регулятора с перестраиваемой моделью (рисунок 9).

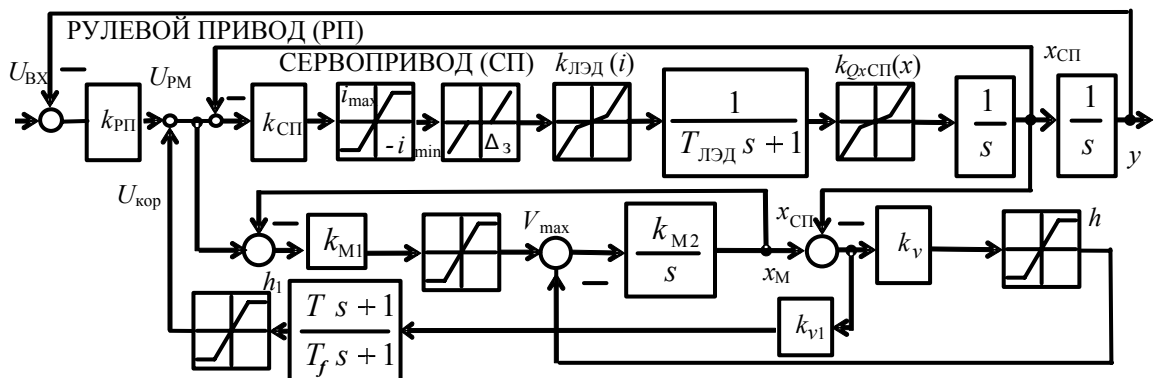


Рисунок 9– Модель рулевого привода с модифицированным адаптивным регулятором.

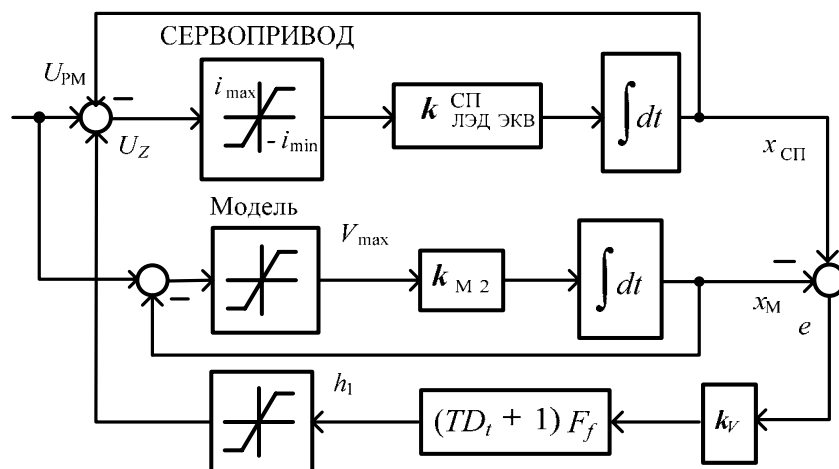


Рисунок 10– Работа адаптивной системы с ЭМ при ограничении сигналов управления

С учетом практической реализуемости алгоритма на микроконтроллере, схема адаптивного регулятора включает в себя следующие отличительные особенности.

- Для исключения скользящих режимов и удобства цифровой реализации адаптивного регулятора произведена замена знаковой функции **sign** в адаптивном механизме (14) и (18) на функцию ограничения **sat**.
- Формирование вектора ошибки переменных состояния объекта относительно модели управления формируется путем дифференцирования ошибки между объектом и моделью.
- В модель объекта вводится ограничение на ее скорость V_{\max} в момент ограничения скорости объекта управления.
- При малых сигналах управления (до наступления ограничения в объекте), согласование движения модели и объекта управления производится в соответствии с принципами адаптивной системы с НМ.

В соответствии с уравнениями (15)–(18) и схемой на рисунке 9 имеем:

$$\begin{cases} \dot{x}_m = -k_{m1}k_{m2}x_m - k_v k_{m2}(x_m - x_{сп}) + k_{m1}k_{m2}g, \\ \mu = TD_t[k_v k_{v1}(x_m - x_{сп})]F_f + k_v k_{v1}(x_m - x_{сп})F_f, U_{СП} \triangleq g. \end{cases}$$

- При больших сигналах управления, когда скорости объекта и модели ограничены, ограничивается и сигнал согласования модели. В этом случае адаптивный механизм перестраивает систему на работу с ЭМ (рисунок 10).
- Адаптивный механизм формирует сигнальное адаптивное воздействие в виде линейной комбинации составляющих вектора ошибки с учетом ограничения h_1 и дифференцирования $(TD_t + 1)F_f$ с малоинерционной фильтрацией.

Результаты исследования показали высокую эффективность адаптивного регулятора, что подтверждается частотными характеристиками сервопривода (РМ) на стендовых испытаниях цифровой двухконтурной рулевой системы СПМ6-П без адаптивного регулятора и при его включении. На рисунках 11-12 продемонстрирована эффективность включения АР (рисунок 12), заключающаяся в сближении частотных характеристик сервопривода на малых уровнях управляющего сигнала к характеристикам при больших уровнях в требуемой полосе пропускания, что свидетельствует о линеаризации нелинейностей ЛЭД и сервопривода и повышении динамической точности рулевой системы.

В четвертой главе обосновывается редуцированная модель электрогидравлической рулевой системы с упругими связями с нагрузкой вида:

$$m \ddot{y}_n + b \dot{y}_n = C (y - y_n), \quad (19)$$

$$M \ddot{y} + f \dot{y} + C(y - y_n) = Ap, \quad (20)$$

$$k_{Q_x} x_{рм} = A \dot{y} + V/2E p, \quad (21)$$

пригодная для синтеза предлагаемых адаптивных регуляторов упругого объекта.

Обосновывается эффективность коррекции (демпфирования) РП по сигналу, пропорциональному упругой силе F_y нагрузки, как по положению y исполнительного механизма, так и по положению y_n нагрузки массы m .

Для демпфирования упругих колебаний в нагрузке и РП разработан модально адаптивный регулятор, использующий для оценки упругой силы в нагрузке модель на основе уравнений: (19), (20), (21)

$$\dot{x} = A_{04}x + b_{04}u, \quad y = C_4x, \quad (22)$$

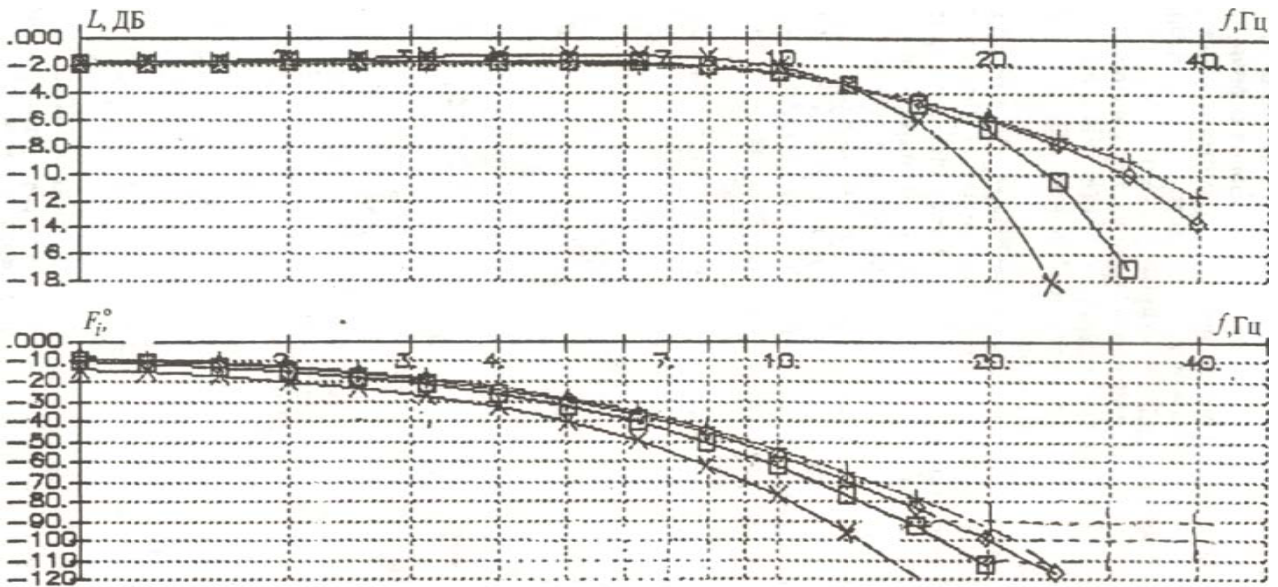
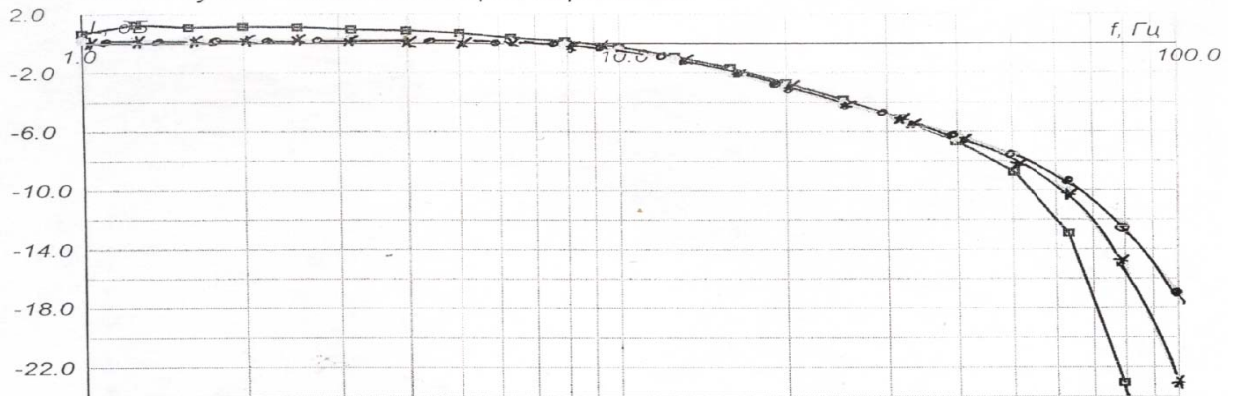


Рисунок 11—Частотные характеристики сервопривода (PM) без AP при $A_{PM} = 0,05, 0,1, 0,2, 0,3$ мм

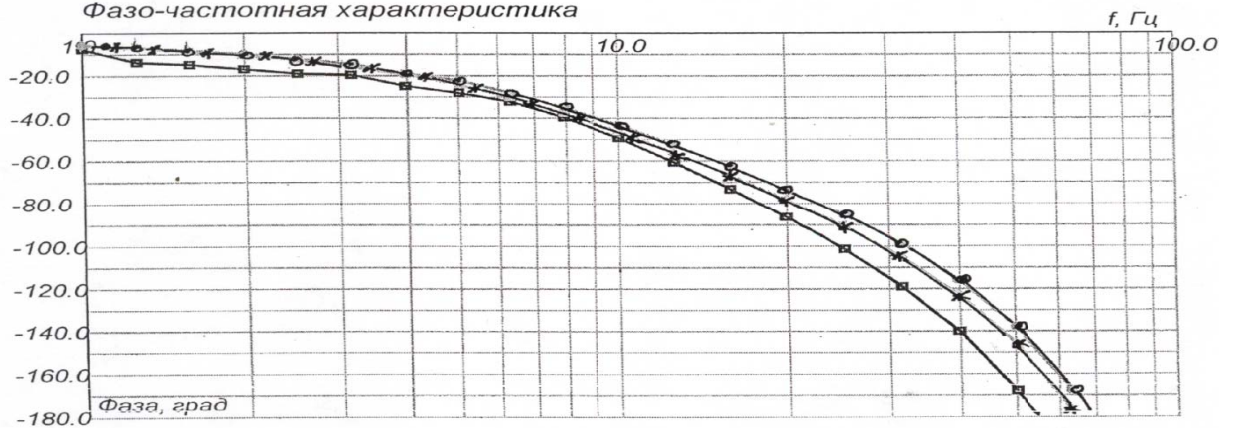
СПМ-50 № 1070004 с БУП-50 № 12. 27.05.10г.

PM:1+2ГС280,1+2+3к,ПП4056А,Крм=2,Арм=0.2, 0.1, 0.05мм

Амплитудно-частотная характеристика



Фазо-частотная характеристика



PM
ΔVx, мм

- 0,05 — RM50N04M.SWP - 18 : 7/6 (ампл. 0.011В, $L_{max}(F=1.259Гц) = 1.262дБ$, фаза($F=1Гц$) = -7.438°
- 0,2 — RM50N04M.SWP - 15 : 7/6 (ампл. 0.045В, $L_{max}(F=3.162Гц) = 0.309дБ$, фаза($F=1Гц$) = -5.478°
- 0,1 — RM50N04M.SWP - 16 : 7/6 (ампл. 0.023В, $L_{max}(F=3.162Гц) = 0.265дБ$, фаза($F=1Гц$) = -5.468°

Рисунок 12 — Частотные характеристики сервопривода (PM) с AP при $A_{PM} = 0,05, 0,1, 0,2$ мм

где $x = [p, y, \dot{y}_n, y_n]$, $C_4 = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$, $u = x_{pm}$ – выход сервопривода, p – перепад давления на поршне массой M и площадью A ; f, b – коэффициенты скоростного трения, C – эквивалентная жесткость, $k_{Qx}, V/E$ – коэффициенты гидравлического усиления.

Модель (22) включает в себя адаптивный наблюдатель состояния

$$\dot{\hat{x}} = A_0 \hat{x} + G C_3 (x - \hat{x}) + b_0 u_1 + z(t), \quad (23)$$

$$z(t) = -h P^{-1} C_3^T \text{sign}(C_3 (x - \hat{x})), \quad (24)$$

где $\hat{x} = [\hat{y}, \hat{y}_n, \dot{\hat{y}}_n]^T$, $C_3 = [1 \ 0 \ 0]$, $u_1 = [p_m, p]^T$,

$$A_0 = \begin{bmatrix} -\frac{c}{f} & 0 & \frac{c}{f} \\ \frac{c}{m} & -\frac{b}{m} & -\frac{c}{m} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad b_0 = \begin{bmatrix} \frac{A}{f} & 0 \\ 0 & \frac{A}{m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Введение обратной связи по перепаду давления на вход наблюдателя осуществляет настройку идентификатора по возмущению. Матрица P рассчитывается из уравнения Ляпунова $A_H^T P + P A_H = -Q$, $Q = Q^T > 0$. Для адаптивного закона настройки, использующего матрицу $P^{-1} C$, вычисляются элементы столбца $P^{-1} C = DC = [d_{11}, d_{21}, d_{31}]^T$.

Уравнения адаптивного регулятора для подавления упругих колебаний в рулевом приводе при учете упругих связей с нагрузкой имеют вид

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{p}} \\ \dot{\hat{y}} \\ \dot{\hat{y}}_n \\ \dot{\hat{y}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{A^2 2E}{fV} & \frac{CA2E}{fV} & 0 & -\frac{CA2E}{fV} \\ \frac{A}{f} & -\frac{C}{f} & 0 & \frac{C}{f} \\ 0 & \frac{C}{m} & -\frac{b}{m} & -\frac{C}{m} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{y} \\ \hat{y}_n \\ \dot{\hat{y}}_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} (y - \hat{y}) + \begin{bmatrix} G_x \frac{2E}{V} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{A}{m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{pm} \\ p \end{bmatrix} + h \begin{bmatrix} 0 \\ d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \end{bmatrix} \text{sgn}(y - \hat{y}),$$

$$x_{pm} = \{(g - k_{oc} y) k_e - (T_1 + T_2 D_t) [C(\hat{y} - \hat{y}_n)]\} k_{pm}. \quad (26)$$

Проведенный анализ переходных и частотных характеристик предложенного в работе модально адаптивного алгоритма управления (26) рулевым приводом с упругими связями с нагрузкой показал, что адаптивный регулятор с настройкой по возмущению РП (оцениваемому по перепаду давления) эффективно подавляет упругие колебания, как по управлению, так и при действии внешнего возмущения со стороны нагрузки. На рисунке 13 представлены ЛЧХ и переходные характеристики (ПХ) рулевого привода с упругими связями, снятые с выхода РП, а также с выхода нагрузки (т.е. руля). Наброс нагрузки осуществлялся силой $F_H = 500$ кгс на 3 секунды. Эффективность включения адаптивного регулятора оценивалась по снижению амплитуды ЛАХ на частоте резонанса и степени демпфирования переходных процессов по управлению и возмущению. Из приведенных переходных и частотных характеристик видно полное совпадение результатов демпфирования упругой системы, проводимой по упругой силе и ее оценке, снимаемой с наблюдателя, настраиваемого по перепаду давления.

В условиях отсутствия в рулевой системе информации о перепаде давления p , в работе предлагается производить его оценку с помощью настраиваемой модели. В этом случае предлагается построить модально адаптивный регулятор с редуцированным настраиваемым идентификатором упругой силы для подавления упругих колебаний рулевой системы. Основу **редуцированного адаптивного регулятора** определяет уравнение (20) заявленной упругой модели системы для синтеза управления.

Для оценки неизмеряемых переменных давления p и скорости поршня \dot{y} предлагается использовать редуцированный настраиваемый наблюдатель:

$$\dot{\hat{x}}_k = (A_{22} - LA_{12}) \hat{x}_k + (A_{21} - LA_{11}) x_r + L \dot{x}_r + (B_2 - LB_1) u - z, \quad (27)$$

с сигнальной ($k \times 1$) настройкой вида:

$$z = -h P_k^{-1} C_k^T \text{sign} C_k \hat{e}_k, \quad (28)$$

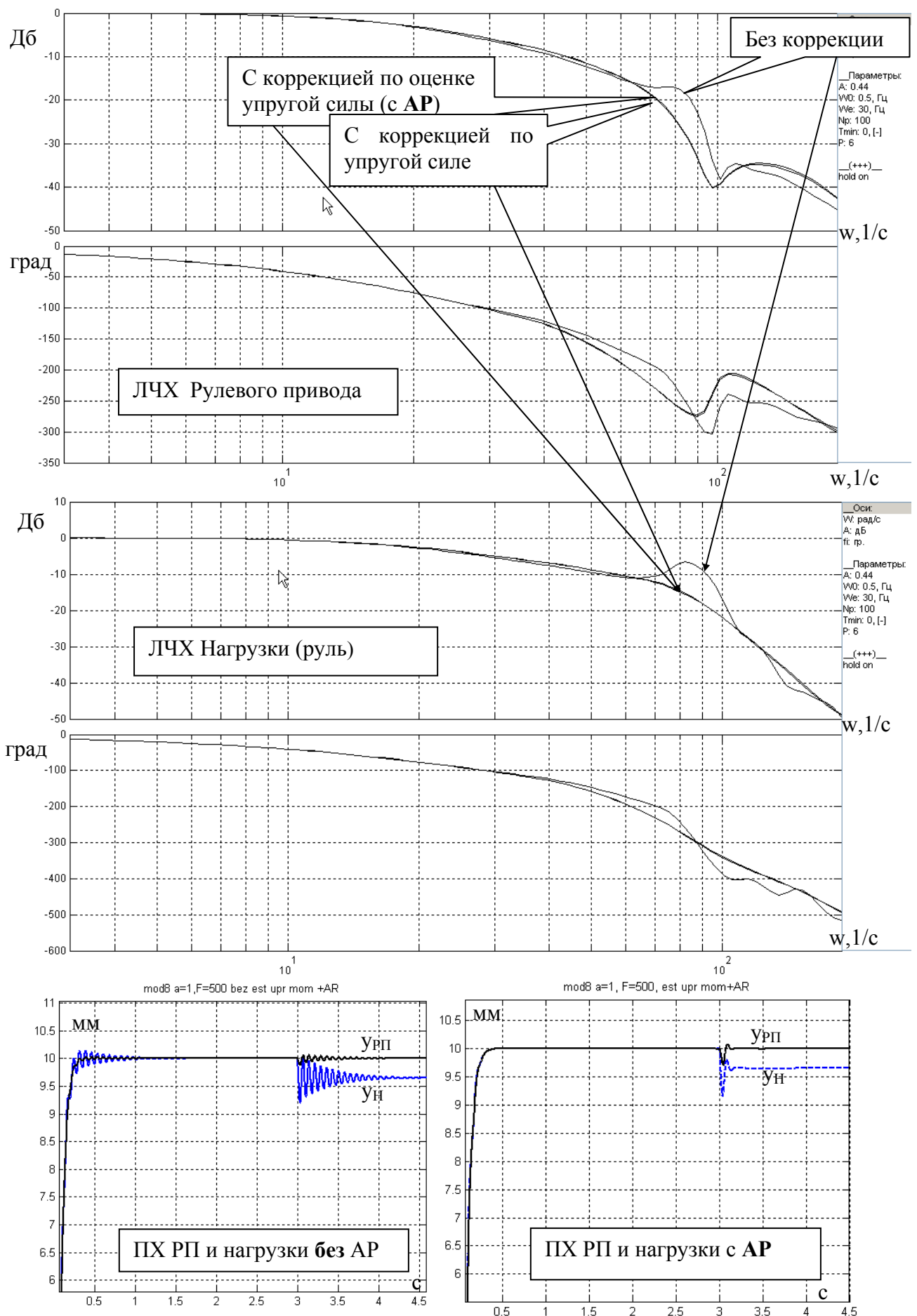


Рисунок 13— Характеристики РП с упругой связью с нагрузкой и AP с НМ по перепаду давления

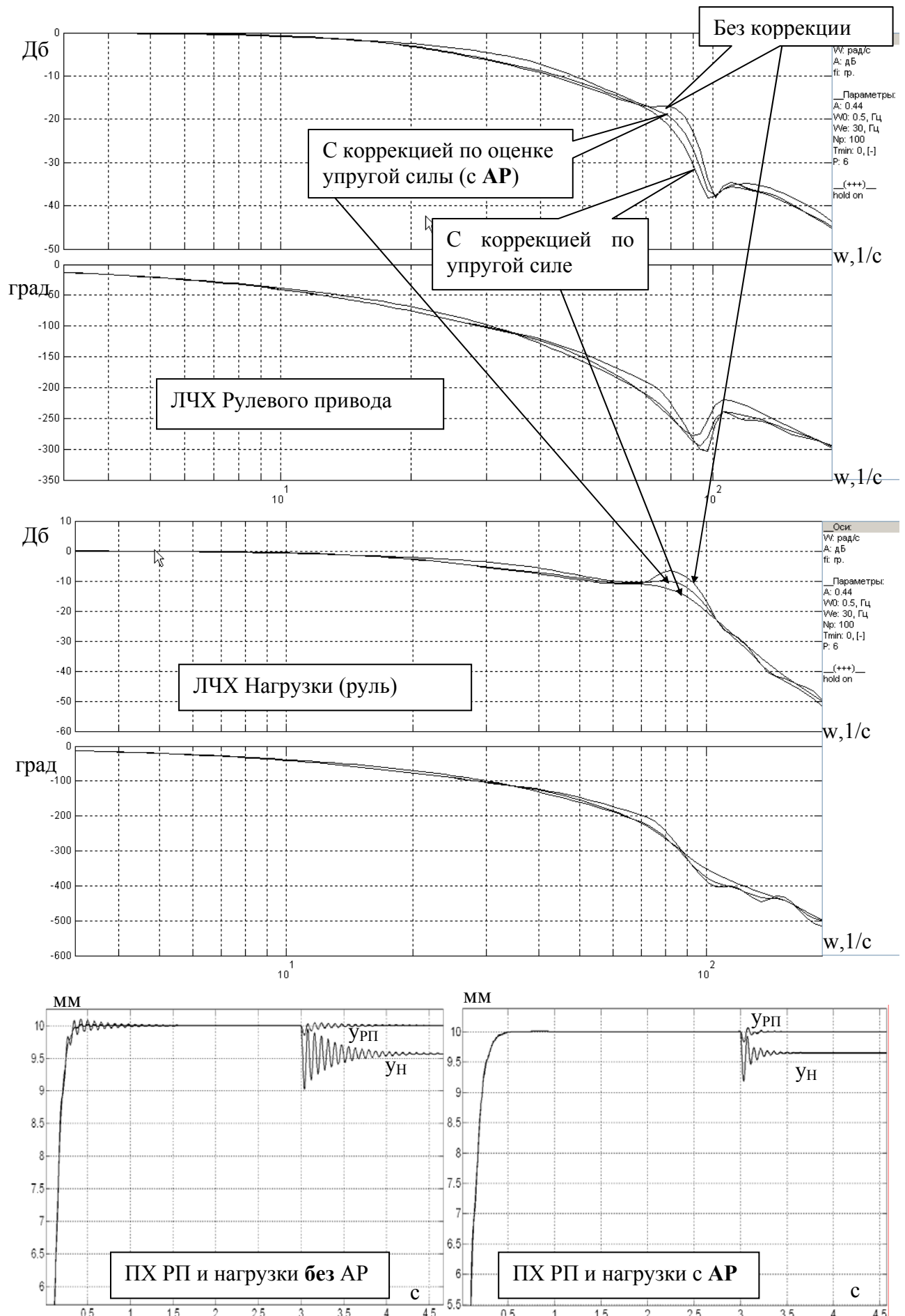


Рисунок 14— Характеристики РП с упругой связью с нагрузкой и АР с редуцированной моделью.

где x_r – ($r \times 1$) вектор состояния измеряемых переменных ($x_r = y$), x_k – ($k \times 1$) вектор состояния неизменяемых переменных ($x_k = [\dot{y}, p]^T$), u – сигнал управления (определяемый по выходному сигналу сервопривода $u = x_{PM}$), блочные матрицы с параметрами системы

$$A_{11} = 0, A_{12} = [1 \ 0], A_{21} = [0 \ 0]^T, B_1 = 0, A_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{M} & \frac{A}{M} \\ -\frac{A2E}{V} & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_{QE}}{V} \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}.$$

Уравнения модально адаптивного регулятора с редуцированным настраиваемым идентификатором упругой силы для подавления упругих колебаний РП имеют вид:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\hat{y}} \\ \dot{\hat{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{M} - l_1 & \frac{A}{M} \\ -\frac{A2E}{V} - l_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{y} \\ \hat{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \dot{y} + \begin{bmatrix} 0 \\ G_x \frac{2E}{V} \end{bmatrix} x_{PM} + \begin{bmatrix} hh_1 \text{sign} \hat{e}_2 \\ hh_2 \text{sign} \hat{e}_2 \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$x_{PM} = [(u_{PP}^{BX} - k_{oc}y)k_e - (T_1 + T_2 D_t) \hat{F}_y] k_{PM}, \quad (30)$$

$$\hat{F}_y = A \hat{p} - f \hat{y}, \quad (31)$$

где элементы матрицы наблюдателя L , рассчитанные методами модального управления ($l_1 = 3\sqrt{2}\omega_0 - \frac{f}{M}$, $l_2 = \frac{9\omega_0^2 M}{A} - A 2E/V$), $\hat{e}_2 = x_2 - \hat{x}_2$, h_1, h_2 – элементы матрицы $H_k = P_k^{-1} C_k^T$ ($k = 2$), C_k – ($r \times k$) – матрица измеряемого выхода системы, k_e, k_{PM} – коэффициенты усиления, соответственно, РП и РМ, T_1, T_2 – весовые коэффициенты закона управления. Элементы обратной матрицы P_k^{-1} – ($k \times k$) отыскиваются на решениях уравнения Ляпунова $(A_{22} - LA_{12})^T P_k + P_k (A_{22} - LA_{12}) = -Q_k$, где $Q_k = \text{diag}(q_1, q_2)$, $q_1, q_2 > 0$.

Достоинством разработанного адаптивного регулятора является оценка упругой силы \hat{F}_y по уравнению (31) в структуре устройства. Эффективность демпфирования упругих колебаний РП и нагрузки с помощью разработанного алгоритма управления представлена на рисунке 14. При отсутствии информации о перепаде давления эффективность демпфирования снижается, что видно из сравнения ЛАХ упругой системы с коррекциями по силе упругости и по ее оценке. Из переходных характеристик, представленных на рисунке 14, следует заключить, что предложенный адаптивный регулятор с редуцированным настраиваемым идентификатором упругой силы подавляет упругие колебания по управлению и осуществляет их демпфирование по возмущению.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель ЛЭД с учетом параметров магнитной цепи в виде нелинейной динамической системы. Предложен способ аппроксимации модели, с сохранением определяющих нелинейных особенностей ЛЭД. Теоретически обосновано используемое на практике представление двигателя с эмпирическими нелинейными звеньями.
2. Разработан модифицированный адаптивный регулятор с перестраиваемой моделью, который за счет введения нелинейных блоков ограничений в саму модель и в контур настройки модели, обеспечивает повышение динамической точности адаптируемой системы на малых уровнях сигнала. До наступления ограничения адаптивная система с настраиваемой моделью, линеаризует функциональные нелинейности в адаптируемом контуре. На больших сигналах, за счет наступления ограничений по уровням управления, адаптивная система уже с эталонной моделью, в качестве которой выступает ограниченный по скорости адаптируемый контур, снижает интенсивность корректирующего воздействия, когда контурного коэффициента достаточно для достижения требуемой точности.

3. Разработана и обоснована математическая модель двухконтурной, с учетом модели ЛЭД, электрогидравлической рулевой системы с упругими связями с нагрузкой, на основе которой синтезируется регулятор подавляющий упругие колебания.
4. Разработан модально адаптивный регулятор, который по оценке силы упругости, получаемой с настраиваемой модели с учетом введения настройки по возмущению, по информации с датчика перепада давления, подавляет упругие колебания в приводе и нагрузке.
5. Разработан модально адаптивный регулятор, который в отсутствии информации с датчика перепада давления, позволяет косвенно оценить силу упругости по информации, получаемой с редуцированного наблюдателя с сигнальной настройкой без операции дифференцирования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Публикации, входящие в перечень изданий и журналов, рекомендованных ВАК России

1. Кузнецов А.В. Мехатронный электрогидравлический модуль с цифровым управлением [Текст]/ Поляхов Н.Д., Вашкевич О.В. Кузнецов В.Е., Кузнецов А.В. Беспалов А.В. Якупов О.Э. // Известия государственного электротехнического университета. Сер. «Автоматизация и управление».- СПб.:СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006 № 1. – С. 43-46.
2. Кузнецов А.В. Исследование динамики распределения жидкости в аксиально-поршневом насосе электрогидропривода с дросселированием потока в линиях всасывания и нагнетания [Текст]/ Поляхов Н.Д., Вашкевич О.В. Кузнецов В.Е., Кузнецов А.В. Беспалов А.В. Якупов О.Э. // Известия государственного электротехнического университета. Сер. «Электротехника».- СПб.:СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006 № 1. – С.30-36.
3. Кузнецов А. В. Адаптивная система управления гидроприводом [Текст]/ Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Кузнецов В.Е., Якупов О. Э., Кузнецов А. В., Вашкевич О. В. // Мехатроника, Автоматизация, Управление. –2007. –№11. – С.12-15.

Другие статьи:

4. Кузнецов А.В. Некоторые вопросы разработки адаптивных рулевых приводов для систем управления полетом маневренных самолетов [Электронный ресурс]/ П.Г. Редько, Г.В Квасов, С.В. Константинов, Н.Д. Поляхов, А.В. Кузнецов, О.Э. Якупов// Материалы IX Междунар. Научн. Техн. Симп. «Авиационные технологии XXI века» (ASTEC-07), (МАКС-2007), Москва, Жуковский, 17-23 августа 2007г. – Москва, 2010. – 10 с. – 1 электрон. опт. диск.
5. Кузнецов А.В. Исследование адаптивной системы управления электрогидравлическим следящим приводом [Текст] /В.Е. Кузнецов, А. В. Кузнецов, Н.Д. Поляхов, О.Э. Якупов // Материалы Межд. Науч-Техн. Конф. «Мехатроника, автоматизация, управление – 2007», (ИКТМ-2007), п. Дивноморское, Геленджик, 24-29 сент. 2007г. – Таганрог.: Изд. ТТИ ЮФУ, 2007. – С. 231-236.
6. Кузнецов А.В. Применение новых подходов для разработки рулевых приводов перспективных маневренных самолетов / Константинов С.В., Редько П.Г., Квасов Г.В., Каннер М.Г., Косарев В.А., Смородин И.В., Кузнецов А.В. // Полет .– 2009№3.– С.28-37.
7. Кузнецов А.В. Улучшение характеристик линейного электродвигателя средствами адаптивного управления [Текст]/ Поляхов Н.Д., Кузнецов А.В., Кузнецов В.Е., Якупов О.Э., Поляхова В.А., Вейнмейстер А.В. //Материалы VI Межд. (XVII Всероссийской) конф. по автоматизированному электроприводу «АЭП – 2010», Тула, 28 сент. – 1окт. 2010 г. / Тульский гос. ун-т. – Тула.: Известия ТулГУ, технические науки 2010.–Вып.3, часть 4.–С.150-158.