

На правах рукописи



Зыонг Дык Ха

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ
УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

Специальность: 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования
(в электронике, радиотехнике и связи)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2014

Работа выполнена на кафедре «Конструирование, технология и производство радиоэлектронных средств» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Чайка Юрий Владимирович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Пиганов Михаил Николаевич**
доктор технических наук, профессор Самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С. П. Королева (НИУ)

Власов Андрей Игоревич
к.т.н., доцент, лауреат Государственной Премии России, заместитель заведующего кафедрой "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры" по научной работе МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ведущая организация: ООО «НПО «Лианозовский электромеханический завод»

Защита состоится « 02 » декабря 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете), расположенном по адресу: 125993, Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=51681

Автореферат разослан « » октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.02,
канд. тех. наук, доцент


А. М. Петраков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования:

В радиотехнических системах управления воздушным движением (РТС УВД) электроприводы применяют для управления угловым положением антенн при постоянном круговом вращении, при сканировании в ограниченном секторе и при сопровождении объектов. Современный этап развития РТС УВД характеризуется существенным ростом требований к точности и быстродействию позиционирования антенных систем с электромеханическими приводами. Например, согласно рекомендациям ИКАО, погрешность определения угла места в глиссадном канале посадочных РЛС не должна превышать 0,3 градуса, темп поступления данных как по дальности, так и по наклону должен быть не менее 8 отсчетов в секунду.

Контур управления антенной системой представляет собой сложную систему, состоящую из механической подсистемы (передаточные механизмы), электромеханической подсистемы (электродвигатель, датчики углового положения) и электронной подсистемы управления.

Электродвигатель и передаточные механизмы имеют ограниченные возможности изменения своих параметров, а параметры электронной подсистемы могут варьироваться в широких пределах. Следовательно, повышение точности и быстродействия антенных систем РТС УВД возможно в основном за счет совершенствования ЭУУ. В то же время существует тесная взаимосвязь параметров контура управления антенной системой РТС УВД с параметрами всех его подсистем, а для определения внешних параметров ЭУУ необходимо знать частотные и/или переходные характеристики и механической, и электромеханической подсистем.

Поэтому задача разработки методики автоматизации системного проектирования электронных устройств управления электроприводом, учитывающей взаимосвязи и взаимозависимость параметров подсистем РТС УВД, является **актуальной**.

Целью диссертационной работы является повышение качества функционирования РТС УВД путем автоматизированного проектирования ЭУУ электроприводами антенн.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются **следующие задачи:**

- установление взаимосвязи и взаимозависимости внешних характеристик ЭУУ от параметров механической и электромеханической подсистем РТС УВД;
- разработка методики моделирования подсистем РТС УВД (механической, электромеханической, ЭУУ), позволяющей моделированием средствами САПР определять их передаточные, частотные и переходные характеристики;
- разработка моделей электромеханической подсистемы и механической подсистемы;
- разработка методики автоматизированного системного проектирования электронных устройств управления электроприводом антенных систем РТС УВД.

Признаками **научной новизны** обладают следующие положения, выносимые на защиту:

1. Методика системного проектирования ЭУУ, предназначенных для работы в качестве составной части контура управления высокоточными электроприводами антенных систем РТС УВД на базе бесконтактных моментных электродвигателей, отличающаяся использованием принципа электромеханической аналогии для определения параметров подсистем привода и совместного моделирования подсистем привода в единой моделирующей среде.

2. Методика построения моделей бесконтактных электродвигателей, отличающаяся тем, что драйвер двигателя и двигатель моделируются как единая электромеханическая система, а построение модели по принципу электромеханической аналогии в форме электрической схемы дает возможность использовать PSpice в качестве инструмента моделирования.

3. Методика построения моделей передаточных механизмов, отличающаяся тем, что построение модели по принципу электромеханической аналогии дает возможность средствами PSpice выполнять совместное моделирование устройства управления, двигателя и передаточного механизма в составе привода для оценки показателей качества функционирования привода.

4. Методика оптимизации характеристик звеньев электронных устройств управления РТС УВД, синтезированных известными формальными методами, с целью получения более высоких точностных характеристик привода, быстродействия привода, энергоэффективности средствами подсистемы параметрической оптимизации пакета программ PSpice.

Практическая значимость:

Разработанная в диссертационной работе методика автоматизированного системного проектирования электронных устройств управления электроприводами позволяет сократить сроки и уменьшить трудоемкость проектирования устройств управления приводами антенных систем радиолокационных средств управления безопасностью воздушного движения, а также обеспечить оптимизацию этих устройств по показателям качества функционирования привода в целом.

В диссертационной работе предложены модели бесконтактных электродвигателей, позволяющие рассчитывать частотные и переходные характеристики системы драйвер ЭУУ -мотор, модели зубчатых передач, позволяющие рассчитывать частотные и переходные характеристики передаточного механизма и моделировать многозвенные передачи за счет каскадного соединения моделей отдельных звеньев. Это делает возможным выполнять совместное моделирование электронных и механических узлов управления приводами в единой среде моделирования OrCAD-PSpice.

Подсистема параметрической оптимизации системы PSpiceдает возможность осуществлять оптимизацию параметров электронных устройств управления по критериям точности электропривода, быстродействия привода, энергоэффективности, а также по комплексному показателю качества.

Внедрение результатов диссертации:

Методика построения моделей бесконтактных электродвигателей, и методика построения моделей передаточных механизмов, основанные на применении принципа электромеханической аналогии, внедрены в учебный процесс кафедры 404 МАИ при проведении практических и лабораторных занятий по дисциплине «Компьютерное моделирование конструкций и технологических процессов РЭС».

Методология и методы исследований:

Расчет параметров передаточных характеристик электропривода как следящей системы, а также переходных и передаточных характеристик привода выполняется методами теории автоматического управления.

Оптимизация параметров электронных устройств управления выполняется градиентным методом.

Моделирование электродвигателей и передаточных механизмов выполняется с использованием принципа аналогий (электромеханическая аналогия).

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- Построением моделей с соблюдением правил и ограничений принципа аналогий;

- Использованием известных методов оптимизации и проверенного инструмента оптимизации;

- Сопоставлением результатов экспериментального исследования лабораторного макета привода антенны с характеристиками, полученными моделированием, которые показывают, что расхождение рассчитанных по моделям тяговых и динамических характеристик двигателя отличаются от паспортных данных менее чем на 10%, а рассчитанные по моделям точностные и энергетические характеристики привода антенны отличаются от экспериментальных менее чем на 12 %.

Публикации:

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах, в том числе в 3 статьях в журналах из списка ВАК.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» (16-18 апреля 2013 года, г. Москва.);

- 12-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013» (12-15 ноября 2013 года, г. Москва);

- Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» 22-24 апреля 2014 года, г. Москва).

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Она содержит 110 страниц машинописного текста, включающего 54 рисунков и список литературы из 48 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, её научная новизна и практическая значимость. Сформулированы цели и задачи исследований. Представлены основные научные положения, выносимые на защиту. Даются структура и содержание диссертации. Дана общая характеристика диссертационной работы.

Выполнен анализ влияния характеристик электроприводов управления антеннами на характеристики радиотехнических средств управления воздушным движением.

Сравнение требований к магистральным, первичным, вторичным, диспетчерским и посадочным РЛС УВД показывает, что наиболее сложной стадией полета воздушных судов (ВС) является заход на начало взлетно-посадочной полосы. Выход ВС на начало полосы должен осуществляться с погрешностью не более 5...10 м по курсу, не более 0,5 ... 1,5 м по высоте и не более 3 ... 5 м/с по вертикальной скорости. Весь маневр захода на ВПП с дистанции от 3 км до 7 км занимает всего 50...100 секунд, поэтому к посадочным РЛС предъявляются жесткие требования по точности определения углового положения ВС по азимуту ($0,6...1,0^\circ$), еще более высокая точность (не более $0,3^\circ$) требуется в глиссадном канале. По рекомендациям ICAO темп выдачи данных об отклонениях по курсу и по высоте на борт ВС должен быть не менее 8

отсчетов в секунду. Исходя из неравномерного закона перемещения курсовой и глissадной антенн при сопровождении ВС по глissаде система управления приводами антенн должна обеспечивать следующие параметры:

- СКО погрешности углового положения не более 5...10 угловых минут;
- ширина спектра процесса углового перемещения не менее 25 Гц;
- длительность переходного процесса углового перемещения антенны не более

35 мс.

В первой главе проанализированы особенности системного проектирования электронных устройств управления электроприводом.

Электропривод рассматривается как замкнутая система, состоящая из электронного устройства управления (ЭУУ), электродвигателя, передаточного механизма, полезной нагрузки, а также датчика или датчиков параметров движения нагрузки и/или промежуточных звеньев привода для формирования сигналов обратной связи.



Рисунок 1 –Обобщенная структурная схема электропривода

Анализ особенностей электронных устройств управления электроприводом с бесконтактными электродвигателями(рисунок 2) показывает, что, с одной стороны, драйвер ЭУУ электродвигателя и электродвигатель должны рассматриваться как единое звено контура управления приводам с общей передаточной характеристикой, с другой стороны, драйвер ЭУУ электродвигателя является электронным устройством, параметры которого целесообразно определять и оптимизировать совместно с электронным регулятором контура управления.

Поэтому обосновано рассматривать электронный регулятор и электронный драйвер двигателя совместно при решении задачи оптимизации ЭУУ.

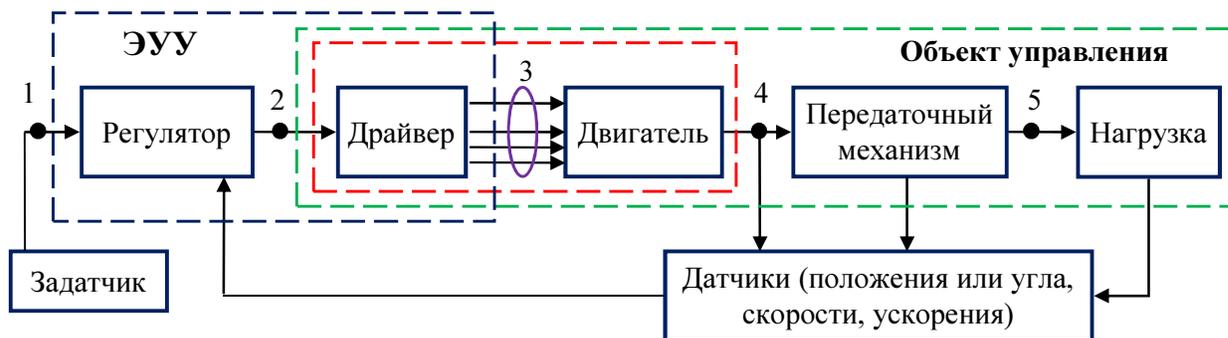


Рисунок 2 – Структурная схема электропривода с бесконтактным двигателем

Были проанализированы методы синтеза электронных регуляторов систем управления приводами (рисунок 3).

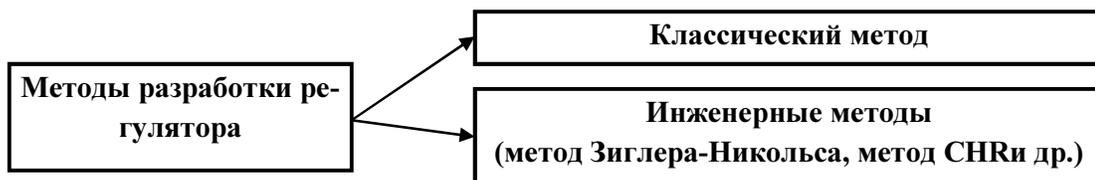


Рисунок 3 – Методы синтеза электронных регуляторов

Синтез характеристики регулятора ЭУУ классическим методом основывается на формировании требований к передаточной характеристике регулятора исходя из требований к точности следящей системы в целом на всех частотах в пределах рабочего диапазона частот входных воздействий (рисунок 4).

Для обеспечения точности привода на любой частоте в рабочем диапазоне частот должно быть выполнено ограничение на коэффициент передачи разомкнутого контура управления на этой частоте:

$$K_{\text{треб}}(\omega) \geq 1/\delta(\omega)$$

Требование к минимальному коэффициенту передачи регулятора в пределах рабочего диапазона частот формируются как разность (в логарифмическом масштабе) требуемой передаточной характеристики контура управления и передаточной характеристики объекта управления.

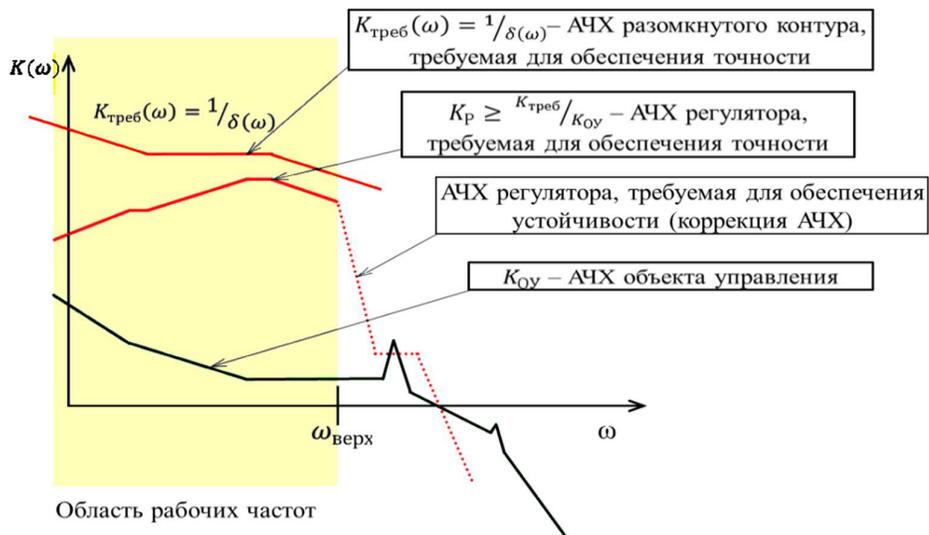


Рисунок 4 – Формирование требований к АЧХ регулятора классическим методом

Совместно с задачей обеспечения требуемой точности привода должна решаться задача обеспечения устойчивости контура управления, для чего необходимо рассматривать амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики регулятора ЭУУ и контура управления в целом, причем не только в рабочем диапазоне частот, но и за его пределами.

Существует ряд инженерных методик синтеза регуляторов ЭУУ для следящих систем, существенно сокращающих трудоемкость их разработки. Одним из таких подходов является реализация электронного устройства управления в виде пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора), структура которого представлена на рисунке 5:

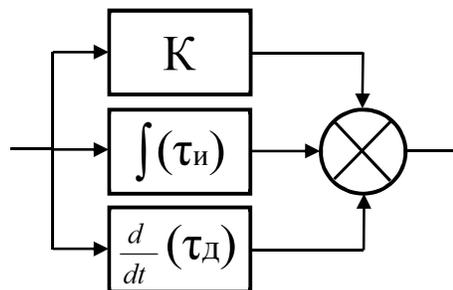


Рисунок 5 – Модель ПИД-регулятора

Достоинством такого подхода является простота расчетов для получения приемлемого варианта устройства. Известны методы настройки ПИД-регуляторов: метод

Зиглера-Никольса, метод CHR. Недостатком является получение результатов, далеких от оптимального, то есть результат синтеза следует рассматривать лишь как начальное приближение для последующей оптимизации.

По результатам анализа сделаны следующие выводы:

1) Привод рассматривается как следящая система с обратными связями, поэтому качество функционирования зависит от всех звеньев, входящие в контур управления.

2) Параметры двигателей, передаточных механизмов могут изменить в небольших пределах или их затруднительно менять, а для ЭУУ доступно изменение параметров в широких пределах.

3) С точки зрения функционирования бесконтактных двигателей работу драйвера ЭУУ и двигателя необходимо рассматривать как единую систему. В то же время с точки зрения аппаратной реализации и оптимизации электронный драйвер целесообразно рассматривать вместе с регулятором как составную часть ЭУУ.

4) Существуют несколько разных методов синтеза регуляторов ЭУУ.

5) Для синтеза и оптимизации передаточной характеристики разомкнутого контура управления любым известным методом необходимо знать фазо-частотную либо переходную характеристику объекта управления, включающего двигатель с драйвером ЭУУ, передаточный механизм и нагрузку.

В соответствии с этими выводами требуются решить **следующие задачи:**

1. разработать методику автоматизации проектирования электронных устройств управления электроприводом.

2. разработать модели электродвигателя, модели передаточного механизма и модели нагрузки, позволяющие автоматизировать анализ их передаточных характеристик в целях синтеза передаточной характеристики регулятора ЭУУ.

3. разработать методику оптимизации параметров электронного устройства управления для обеспечения наилучшего качества функционирования привода в целом.

4. экспериментальное исследование моделей.

Во второй главе диссертации основное внимание уделено разработке системы моделей для синтеза внешних параметров электронных узлов устройства управления электроприводом.

Модель бесконтактного электродвигателя строится по принципу электромеханической аналогии для обеспечения возможности выполнять имитацию работы двигателя в рамках системы моделирования электронных устройств PSpice. Модель двигателя отражает взаимосвязь между напряжениями, приложенными к обмоткам двигателя, токами, протекающими по обмоткам, моментами, приложенными к валу двигателя и угловыми перемещениями (угловой скоростью, угловым ускорением) выходного вала двигателя.

Взаимосвязь между токами, протекающими по обмоткам, и падениями напряжения на обмотках при неподвижном роторе моделируется последовательными RL цепями согласно паспортным данным двигателя. (рисунок 6).

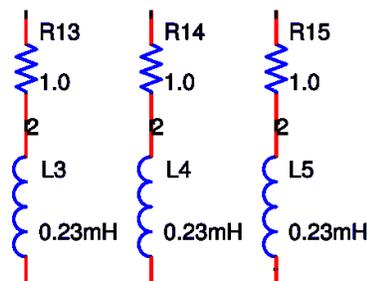


Рисунок 6

Для моделирования взаимодействия магнитного поля, создаваемого системой обмоток статора, с магнитными полями ротора двигателя встроенными средствами OrCAD-PSpice выполняется вычисление интенсивности и углового положения суммарного вектора магнитного поля катушек статора (рисунок 7).

Точная конфигурация магнитных полей внутри двигателя неизвестна, однако в паспортных данных двигателя приводится значение коэффициента момента C_m , который является коэффициентом пропорциональности между величиной тока, протекающего через отдельную обмотку или секцию обмотки двигателя и величиной крутящего момента при таком взаимном положении ротора и статора, когда этот крутящий момент максимален.

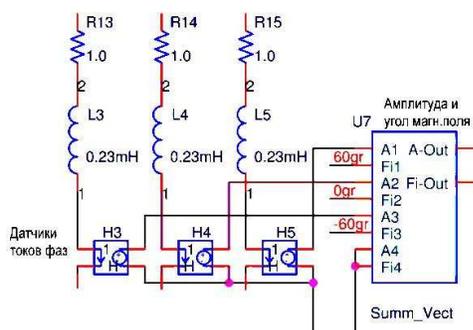
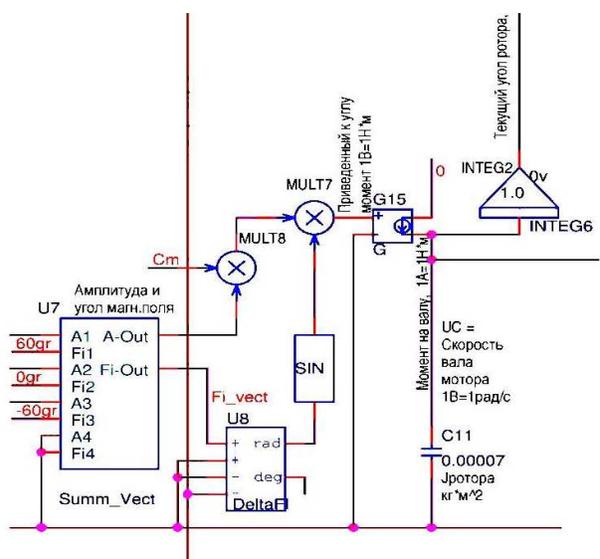


Рисунок 7

Суммарный момент, являющийся результатом взаимодействия токов во всех обмотках с магнитными полями ротора, формируется по схеме на рисунке 8. При этом учитывается мгновенное положение полюсов ротора по отношению к полюсам обмоток двигателя.



$$M = C_m \cdot I_{\text{обм}i} \cdot \sin(\theta_{\text{обм}i} - \theta_{\text{рот}}) = C_m \cdot I_{\text{обм}i} \cdot \sin[(\varphi_{\text{обм}i} - \varphi_{\text{рот}})k_{\text{пол}}]$$

Рисунок 8

На выходном валу двигателя происходит взаимодействие момента, формируемого на роторе двигателя от взаимодействия магнитных полей, момента инерции вала, ротора и нагрузки, момента сопротивления со стороны нагрузки. Модель строится на основе аналогии уравнения движения вала и уравнения для конденсатора (рисунок 9):

$$\frac{\sum M}{\sum J} = \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \ddot{\varphi}(t) = \dot{\omega}(t)$$

$$\frac{\sum i}{\sum C} = \dot{U}(t)$$

Идентификация параметров:

- $M \leftrightarrow i$
- $J \leftrightarrow C$
- $\omega \leftrightarrow U$

Вязкое трение на валу (момент трения пропорционален угловой скорости) моделируется проводимостью резистора, подключенного параллельно конденсатору.

Момент сопротивления (внешний) моделируется включением управляемого источника тока.

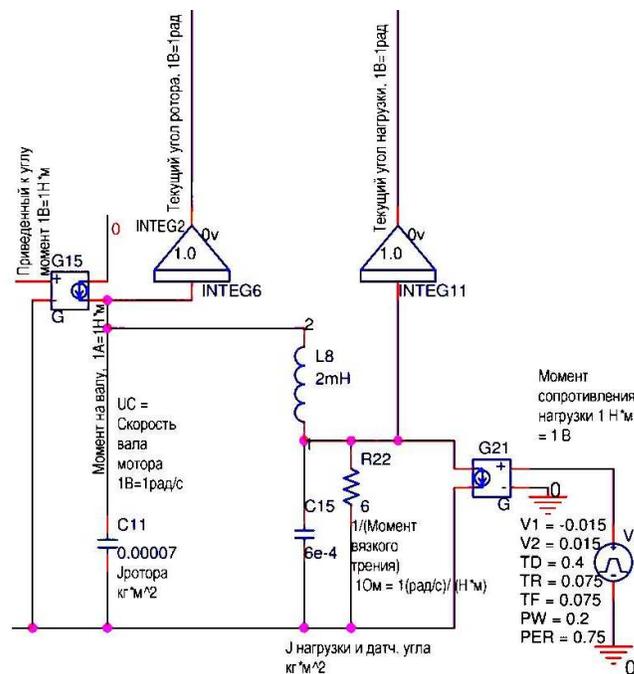


Рисунок 9

Для моделирования динамических свойств передаточных механизмов типа зубчатых передач принимается во внимание жесткость кручения валов, жесткость дисков зубчатых колес (деформация сдвига) и изгибная жесткость зубьев в зацеплении. Инерционные свойства характеризуются моментами инерции валов и дисков колес (рисунок 10).

Электромеханическая аналогия строится на основе сходства структуры дифференциальных уравнений механической крутильной колебательной системы и электрического колебательного контура: аналогом моментов инерции выступает емкость конденсатора, аналогом жесткости упругих элементов – индуктивность катушки. Соответствие параметров модели параметрам механической системы представлено на рисунке 11.

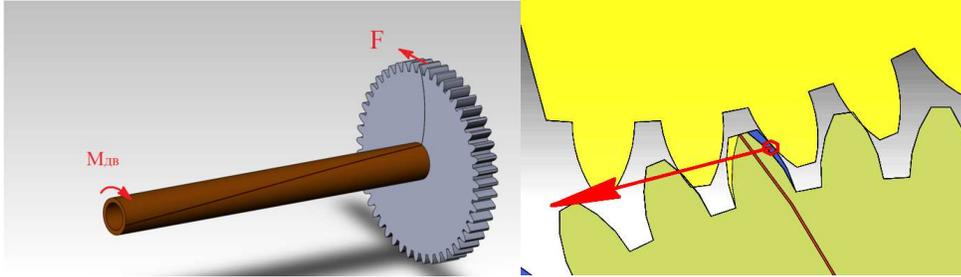
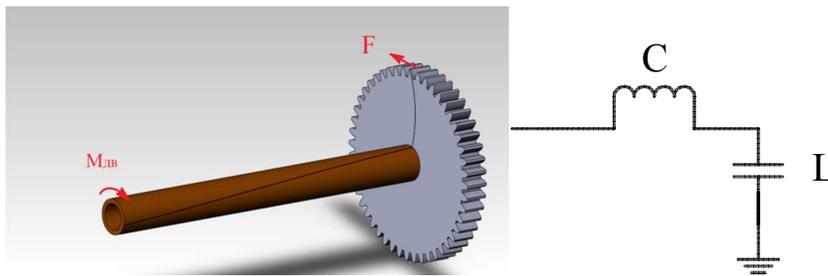


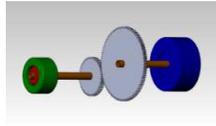
Рисунок 10



$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{M_{(\text{вал})}}{I} & \begin{array}{c} C \\ \text{---} \\ \text{||} \\ \text{---} \end{array} & \frac{dU_C}{dt} = \frac{i_C(t)}{C} & \omega &\leftrightarrow U_C \\
 \frac{dM_{(\text{Колеса})}}{dt} &= C_{\text{Кр}} \cdot \Delta\omega & \begin{array}{c} L \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} & \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} \cdot U_L(t) & M &\leftrightarrow i \\
 & & & & I &\leftrightarrow C \\
 M_{(\text{вал})} = M_{(\text{Колеса})} & \longrightarrow i_C = i_L \longrightarrow & \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} & & &
 \end{aligned}$$

Рисунок 11

Преобразование углового перемещения обода зубчатого колеса в линейное перемещение, приводящее к деформации зуба, а также преобразование усилия, возникающего из-за деформации зуба, в крутящий момент с учетом радиусов зубчатых колес отражено на рисунке 12. Жесткость зубчатых колес при изгибе моделируется проводимостью резисторов R18 и R21.



r_{12} – радиус ведущего колеса
 r_{21} – радиус ведомого колеса

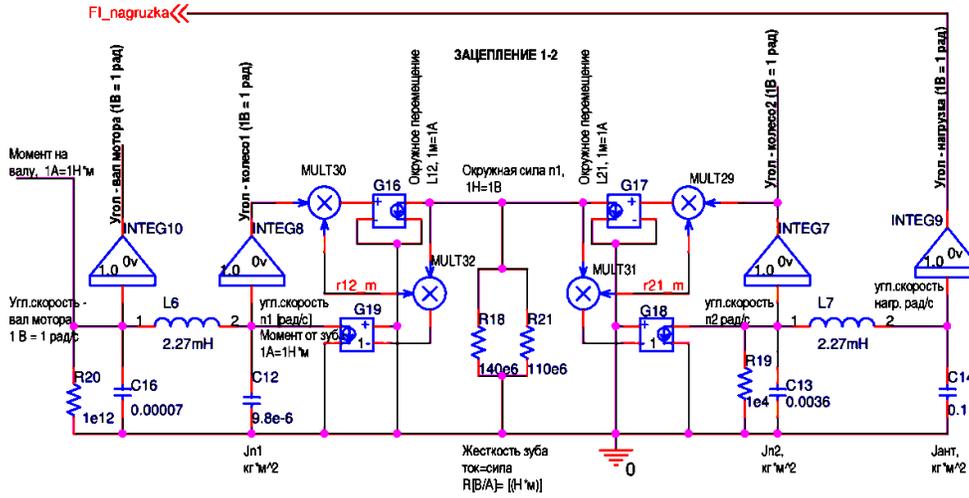


Рисунок 12

Передаточная характеристика нагрузки определяется инерционными свойствами нагрузки (массой или моментом инерции) и зависимостью силы трения или момента от перемещения, скорости, ускорения (рисунок 13). В общем случае, эти зависимости могут быть нелинейными или зависящими от времени.

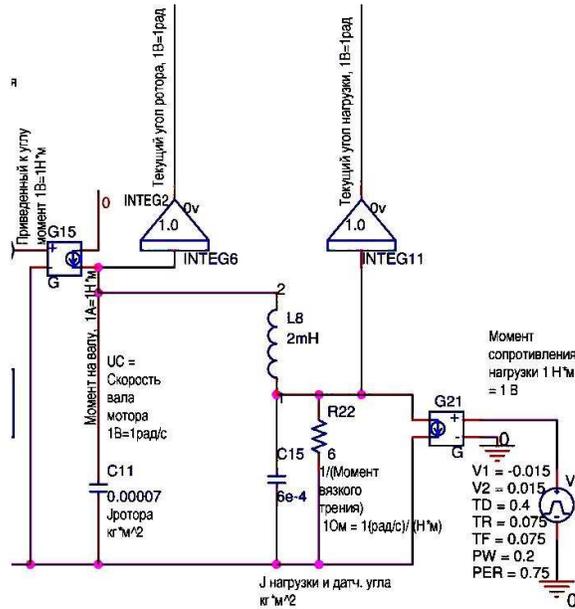


Рисунок 13

В третьей главе рассматривается разработка методике системного автоматизированного проектирования электронных устройств управления электроприводом.

Структурная схема автоматизированного проектирования электронных устройств управления электроприводом приведена на рисунке 14.

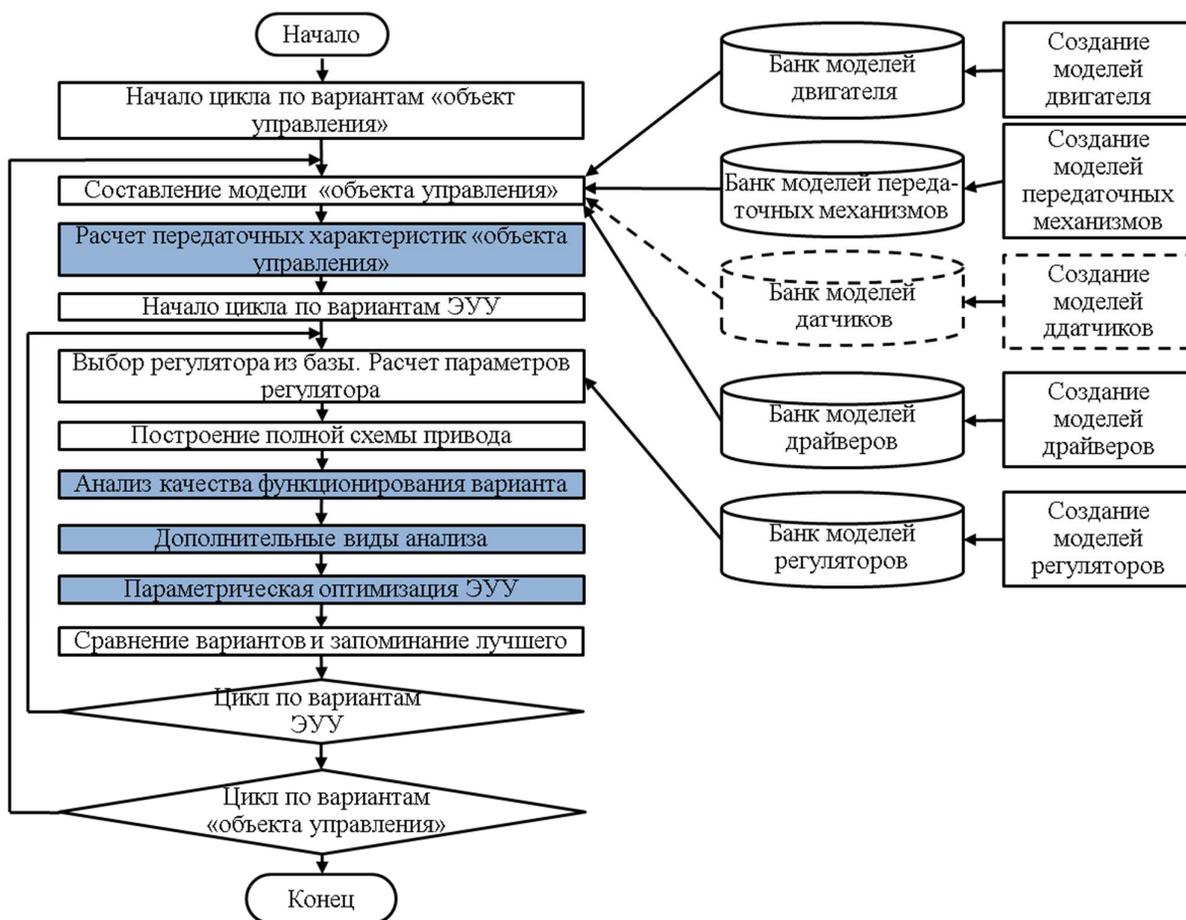


Рисунок 14

Генерация вариантов ЭУУ выполняется в следующей последовательности:

- Модели ранее созданных регуляторов сохраняются в архиве моделей регуляторов.
- Модели ранее созданных драйверов ЭУУ сохраняются в архиве моделей драйверов.
- Очередной вариант ЭУУ образуется соединением варианта модели драйвера, соответствующего выбранному типу двигателя, и варианта модели регулятора.
- Для расчета требуемой передаточной характеристики регулятора ЭУУ из моделей драйвера ЭУУ, модели двигателя, модели передаточного механизма, модели

нагрузки составляется модель «объекта управления» и моделированием в PSpice рассчитывается передаточная характеристика «объекта управления».

– Рассчитываются параметры элементов схемы регулятора ЭУУ для обеспечения желаемой передаточной характеристики аналогового прототипа регулятора.

– Вариант схемы ЭУУ получается объединением модели регулятора и модели драйвера.

– С помощью PSpice выполняется параметрическая оптимизация параметров схемы регулятора ЭУУ в составе модели контура управления и, при необходимости, параметров схемы драйвера ЭУУ.

– При необходимости реализации ЭУУ в виде цифрового устройства реализация строится на базе аналогового прототипа. Определение частоты дискретизации сигналов и величины кванта при переводе в цифровую форму, разрядность обрабатываемых чисел определяется на основании значений ширины спектра и величины сигналов в узлах ЭУУ, полученных в ходе моделирования окончательного варианта ЭУУ.

Известные методы синтеза регуляторов ЭУУ имеет ряд ограничений и недостатков: не учитывают энергетические затраты на управление; не учитывают наличие в контуре управления нелинейных и параметрических звеньев или учитывают их упрощенно; не учитывают реальные режимы работы привода.

Определение параметров качества функционирования моделированием полной модели привода, и оптимизация параметров элементов схемы с помощью PSpice **позволяет:**

1) учитывать при моделировании полной схемы электропривода совместное влияние нелинейностей, внешних возмущений и других погрешности всех звеньев следящей системы;

2) анализировать энергетические потоки в любых элементах модели, причем можно анализировать как усредненные, так и мгновенные мощности.

После синтеза мы можем выполнить оптимизацию параметров ЭУУ (регулятора + драйвера).

Параметрическая оптимизация параметров ЭУУ выполняется с помощью подсистемы параметрической оптимизации PSpice. Метод оптимизации - модифицированный метод градиентного спуска. В качестве варьируемых параметров при оптимизации выступают параметры электрорадиоэлементов моделей звеньев электронного устройства управления. В качестве ограничения оптимизации имеется возможность указать:

- максимальные токи, напряжения, мощности в любых звеньях электропривода;
- допустимые погрешности привода;
- ограничения на показатели качества функционирования привода.

Критерии оптимизации:

- средняя и/или максимальная мощность привода;
- погрешности или другие показатели качества функционирования привода.
- возможно использование комплексного критерия (в форме взвешенной суммы частных критериев или более сложной функции).

При необходимости реализации ЭУУ в цифровом варианте на основании полученных параметров аналогового прототипа и результатов моделирования определяются параметры: частота дискретизации, разрядность АЦП и ЦАП, разрядность арифметических узлов, емкость, организация и быстродействие ЗУ.

Четвертая глава посвящена практическому использованию разработанных моделей и алгоритмов:

1) Разработаны модели бесконтактных двигателей 3ДБМ-50-0,16-4-3 с векторными драйверами. Модели разработаны с использованием только данных из паспортов на двигатели.

2) Разработана модель лабораторного макета редуктора – трехступенчатой зубчатой передачи. Параметры модели рассчитаны на основании чертежей зубчатых колес и валов редуктора.

3) Моделированием определены и сопоставлены с паспортными данными параметры двигателей:

– пусковой момент (входное воздействие – максимальная тяга, фиксация положение выходного вала имитируется подключением источника напряжения к конденсатору C11). Расхождение с паспортными данными 7% (в пределах допуска).

– число оборотов истинного холостого хода (входное воздействие – вращение с завышенной скоростью, нагрузка на выходном валу отсутствует). Расхождение с паспортными данными 8% (в пределах допуска).

– механическая постоянная времени (входное воздействие – скачок на 5 градусов, нагрузка отсутствует). Расхождение с паспортными данными 11% (разброс в паспорте не нормируется).

4) Моделированием получено движение нагрузки по закону, соответствующему сканированию антенны в секторе (разгон с постоянным ускорением, равномерное движение, торможение, разгон в обратном направлении, движение, торможение до остановки). Результаты моделирования отражены на рисунке 15.

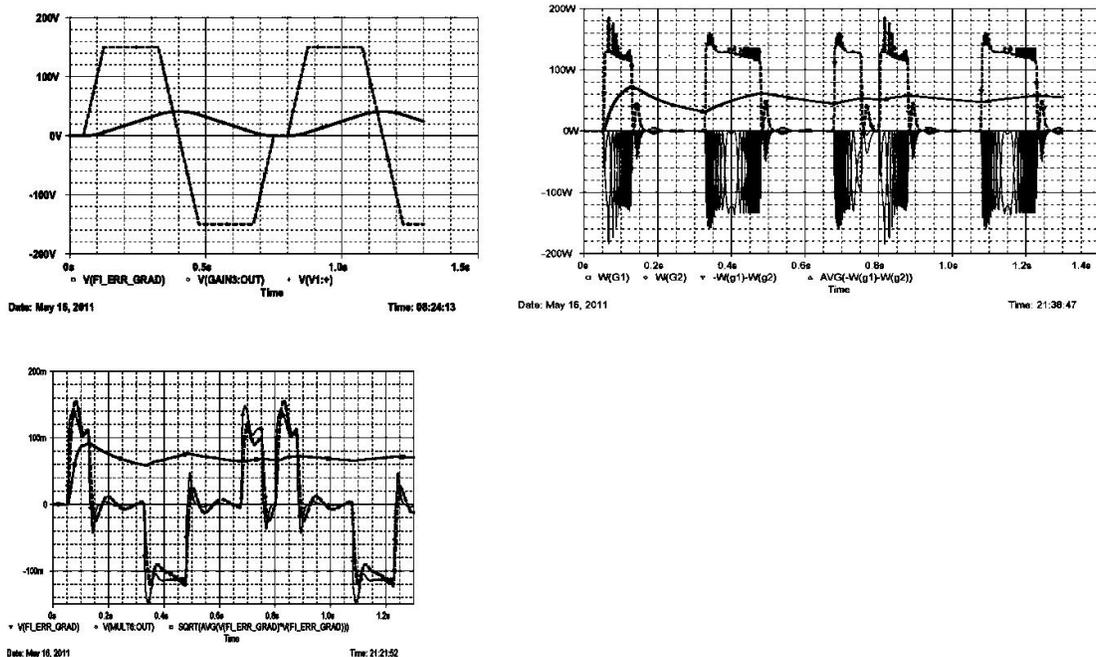


Рисунок 15

5) Выполнено сопоставление параметров макета привода антенной системы, измеренных экспериментально, с параметрами этого же привода, полученных моделированием.

Сопоставление результатов, полученных моделированием, с экспериментальными данными показывает хорошее совпадение:

- среднеквадратичное отклонение ошибки слежения по углу: экспериментальная по записи показаний датчика угла - 6 угловых минут, по результатам моделирования - 6,5 угловых минут.
- средняя потребляемая мощность: экспериментальная - 62 Вт; по результатам моделирования - 55 Вт.

Основные результаты диссертационной работы:

1. Предложена методика автоматизированного системного проектирования электронных устройств управления приводами, которая позволяет:

- автоматизировать получение передаточных характеристик всех звеньев следящей системы как во временной, так и в частотной области, используя встроенные возможности САПР OrCAD-PSpice;

- автоматизировать получение набора функциональных характеристик привода в целом и всех промежуточных звеньев за счет возможности объединения однородных по виду моделей звеньев в единые модели электропривода и использования единого средства моделирования;

- использовать подсистему параметрической оптимизации пакета программы PSpice для автоматизации улучшения характеристик звеньев, синтезированных известными формальными методами, с целью получения более высоких точностных характеристик привода, быстродействия привода, энергоэффективности;

- выполнять моделирование приводов и электронных устройств, содержащих нелинейные и параметрические звенья, а, следовательно, устройств управления с изменяемыми в процессе работы параметрами, а также осуществлять их параметрическую оптимизацию.

2. Установлена взаимосвязь и взаимозависимости между характеристиками подсистем привода (механической, электромеханической, электронным устройством управления), позволяющие выполнять моделирование контура управления антенной системой РТС УВД.

3. Разработана методика моделирования электромеханической и механической подсистем привода, отличающаяся тем, что построение моделей по принципу электромеханической аналогии дает возможность в единой среде моделирования PSpice выполнять совместное моделирование устройства управления, двигателя и передаточного механизма в составе привода для оценки и оптимизации показателей качества функционирования привода.

4. Разработаны модели бесконтактных электродвигателей, позволяющие рассчитывать передаточные, частотные и переходные характеристики подсистемы, состоящей из драйвера ЭУУ и мотора.

5. Разработаны модели зубчатых передач, позволяющие рассчитывать частотные и переходные характеристики передаточного механизма, моделировать многозвенные передачи за счет каскадного соединения моделей отдельных передаточных звеньев.

6. Разработана методика параметрической оптимизации узлов ЭУУ средствами САПР OrCAD-PSpice для автоматизации улучшения характеристик звеньев, синтезированных известными формальными методами, позволяющая получать более высокие точностные характеристики, быстродействие привода и/или энергоэффективность приводов антенных систем РТС УВД.

7. Выполнено экспериментальное исследование лабораторного макета привода антенны, подтверждающие адекватность моделей и результатов моделирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Зыонг Д. Х. Имитационная модель бесконтактного электродвигателя // Электронный журнал «Труды МАИ» 2014, № 73, с. 1–24.

2. Зыонг Дык Ха, Фам Вьет Ань. Разработка регрессионной модели для расчёта площади печатной платы функциональной ячейки // Электронный журнал «Труды МАИ» 2010, № 41, с. 1–17.

3. Зыонг Д. Х., Чайка Ю.В. Автоматизация проектирования электронных устройств управления высокоточными приводами // Электронный журнал «Труды МАИ» 2014, № 75, с. 1–21.

В других изданиях:

4. Зыонг Дык Ха. Построение передаточной характеристики редуктора для синтеза электронных узлов управления высокоточными приводами // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2013» 16-18 апреля 2013 года, Москва. Сборник тезисов докладов, с. 229–230.

5. Зыонг Дык Ха. Имитационная модель бесконтактного электродвигателя // 12-я международная конференция «Авиация и космонавтика – 2013» 12-15 ноября 2013 года, Москва. Сборник тезисов докладов, с. 464–466.

6. Зыонг Дык Ха. Методика автоматизированного проектирования электронных узлов управления высокоточными электроприводами // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» 22-24 апреля 2014 года, Москва. Сборник тезисов докладов, с. 152–153.