На правах рукописи

ХОЛИН Андрей Владимирович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ВЕРТОЛЁТНЫХ ТРАНСМИССИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2012

Работа выполнена на кафедре Автоматизированного электропривода Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель:
Осипов Олег Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры Автоматизированного электропривода НИУ «МЭИ».

Официальные оппоненты:
Овсянников Евгений Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электротехника и компьютеризированные электромеханические системы» Московского государственного технического университета «МАМИ»;
Грехов Виктор Петрович, кандидат технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Московского государственного открытого университета.

Ведущее предприятие: ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова» (ЦИАМ).

Защита диссертации состоится 15 июня 2012 года в аудитории М-611 в 16 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.157.02 при ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13, корпус М.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Отзывы на автореферат с подписями, заверенными печатью учреждения (в двух экземплярах), просим направлять по адресу: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Ученый Совет НИУ МЭИ и e-mail: kholinav@yandex.ru.

Автореферат разослан « » мая 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.157.02
канд. техн. наук, доцент Цырук С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Обеспечить высокие требования к повышению экономичности, надёжности, ресурса и безопасности полётов вертолетов невозможно без организации всесторонних комплексных испытаний заложенных в конструкцию вертолетов отдельных узлов и агрегатов на всех этапах их создания. С этой целью создаются самые разнообразные стенды для различных видов испытаний, в том числе испытательные установки для вертолётных трансмиссий. При этом в качестве испытательных установок для вертолётных трансмиссий нередко используются натурные стенды, где в роли приводных двигателей используются штатные авиадвигатели, а нагружение механической передачи осуществляется за счёт несущего и рулевого винтов вертолёта. Эти установки при высоком качестве проведения испытаний не отвечают требованиям высокой экономичности, надёжности, максимальной автоматизация процесса испытания, унификации технических решений и экологии. В наибольшей мере этому отвечают электромеханические испытательные комплексы. Однако сложность технологической и энергетической взаимосвязи между многодвигательными электроприводами подобных стендов для испытаний вертолетных трансмиссий из-за наличия упругостей в кинематических узлах их механизмов создают ряд проблем при реализации подобных комплексов. К ним следует отнести:

- обоснование мощности элементов силовой части и систем многодвигательного электропривода механизмов испытательной установки с учетом энергетических связей между ними;
- выбор наиболее экономичного технического решения построения силовых цепей электропривода;
- создание систем управления электроприводами испытательной установки, обеспечивающих все её технологические требования, включая требования по подавлению крутильных колебаний в трансмиссионных валах установки;
- создание математической модели многодвигательного электропривода установки, учитывающей особенности построения его силовой части и системы управления и адекватной технической реализации привода установки;
- исследование режимов работы многодвигательного электропривода, оценку влияния на них технологических параметров установки;
- диагностирование технического состояния электропривода установки.

Целью диссертационной работы является разработка, совершенствование и исследование многодвигательного электропривода стенда для испытаний вертолётных трансмиссий с обеспечением его технологической и энергетической эффективностью, включая подавление крутильных колебаний валов из-за наличия упругостей в механических узлах стенда.

Достижение поставленной цели потребовало:

- разработки и выбора элементов силовой части многодвигательного электропривода стенда, анализа его энергетических режимов работы и обоснования выбора мощности привода стенда;

- разработки и анализа математической модели механической части стенда для испытаний вертолетных трансмиссий, а также исследования ее частотных характеристик и переходных функций с учётом упругостей в механических узлах стенда;

- разработки и анализа математической модели силовой электрической части многодвигательного электропривода стенда;

- разработки и исследования систем управления приводными двигателями и нагрузочными генераторами испытательного стенда, ограничивающих крутильные колебания валов трансмиссии на допустимом уровне;

- исследования влияния технологических параметров привода стенда на динамические и энергетические режимы работы многодвигательного электропривода установки;

- разработки алгоритмов диагностирования технического состояния электропривода испытательного стенда.

Методика исследований. Теоретические исследования основывались на общих положениях теории электропривода и теории автоматического управления, методов структурного моделирования. При моделировании использовались программные пакеты Matlab 7.5.0/Simulink и MathCAD 14.0. Исследования проводились на основе математической модели многодвигательного электропривода стенда для испытания главных редукторов вертолётов Ка-226.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Обоснованы технологические требования к многодвигательному электроприводу стенда для испытания силовых трансмиссий вертолетов.

2. Обоснован вариант электрической схемы испытательного стенда, при котором электрическая энергия с выхода нагрузочных генераторов поступает в цепь питания приводных электродвигателей и из сети потребляется лишь энергия для покрытия потерь в элементах стенда.

3. Предложена математическая модель силовой механической части стенда для испытания трансмиссий вертолетов, представляющая пятимассовую систему с массами двух двигателей, двух генераторов и массой испытуемого редуктора.

4. Разработана и исследована математическая модель силовой электрической части стенда, учитывающая наличие в ней отсекающих вентилей.

5. Разработаны системы управления приводными двигателями и нагрузочными генераторами стенда, обеспечивающие ограничение крутильных колебаний в трансмиссионных валах установки на уровне технологически допустимых.

6. Предложен структурно-топологический метод определения чувствительности передаточных функций системы управления электроприводом к отклонению ее параметров и на его основе дана оценка влияния параметров многодвигательного электропривода стенда на его динамические показатели.

7. Предложен алгоритм диагностирования электропривода испытательного стенда.

Практическое значение работы заключаются в следующем:

1. Обоснованы мощности элементов силовой части электропривода стенда. Произведен выбор электрических машин и силовых преобразовательных устройств электропривода. На их основе определены энергетические показатели привода стенда для различных режимов испытания вертолётных трансмиссий.

2. Выявлены резонансные частоты в механической части электропривода стенда, обусловленные наличием в его кинематических звеньях упругих элементов.

3. Разработаны системы управления электродвигателями и электрогенераторами стенда, обеспечивающие основные технологические требования к стенду.

4. Определены параметры регуляторов систем управления каждым из приводных двигателей и нагрузочных генераторов стенда. Дана оценка влияния параметров электропривода на его динамические показатели.

5. Путем анализа функций чувствительности электропривода к отклонению его параметров предложен алгоритм его технического диагностирования и выделения в нем дефектов.

6. На основе разработанных математических моделей электропривода стенда для испытаний главных редукторов вертолетов типа Ка-226 выполнены исследования статических, динамических и энергетических режимов его работы.

Реализация результатов работы.

Результаты теоретических исследований приняты к использованию при проектировании, технической реализации и наладке стендов для испытания трансмиссий вертолетов Ка-226.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждены правомерностью принятых исходных допущений и предпосылок, корректным применением методов теорий электропривода, автоматического управления и математического моделирования.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Вариант построения многодвигательного электропривода стенда для испытания вертолётных трансмиссий, при котором основная мощность электропривода циркулирует в замкнутом энергетическом контуре, а мощность потребления из сети определяется лишь потерями в элементах стенда.

2. Пятимассовая математическая модель механической части стенда, учитывающая наличие в ней упругих элементов и присутствие диссипативных сил трения.

3. Математическая модель силовой электрической части многодвигательного электропривода стенда с учетом отсекающих вентилей.

4. Способ и система управления приводными двигателями и нагрузочными генераторами постоянного тока, обеспечивающие основные техноло-

гические требования к электроприводу стенда для испытания вертолетных трансмиссий, включая ограничение крутильных колебаний их валов.

5. Результаты теоретических исследований электропривода стенда для испытания трансмиссий вертолётов на основе его математической модели.

6. Структурно – топологический метод определения функций чувствительности электропривода к изменению параметров его механической части, а также метод диагностирования электропривода, основанный на анализе функций чувствительности.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на VI Международной (XVII Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу (г. Тула, 2010 г.), на XV и XVI Международных научно-технической конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2009, 2010 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 7 печатных трудах, в том числе одном издании, входящем в перечень рекомендованных ВАК РФ по направлению «Энергетика».

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 60 наименований и 3 приложений объемом 9 страниц. Работа изложена на 160 страницах основного текста, содержит 153 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная и практическая значимость. Сформулированы цель и основные задачи работы.

В первой главе дана характеристика исследуемого объекта управления и рассмотрена функциональная схема механической части стенда для испытаний главных редукторов вертолета Ка-226. Упрощённый вариант функциональной схемы приведён на рис. 1. Испытуемый редуктор ВР-226 (ИР) приводится во вращение электродвигателями Д1 и Д2 через приводные мультипликаторы (редукторы) ПМ1 и ПМ2. Редуктор имеет два выходных вала – наружный вал НВ нижнего несущего винта и внутренний вал ВВ верхнего несущего винта.

Нагрузочные электрические генераторы Г1 и Г2 соединены с выходными валами испытуемого редуктора через нагрузочные мультипликаторы НМ1 и НМ2, которые крепятся к выходным валам испытуемого редуктора через пластинчатые муфты. На валах двигателей и генераторов расположены датчики частоты вращения. Датчики крутящих моментов расположены на валах нагрузочных генераторов, а так же на выходных валах приводных мультипликаторов.

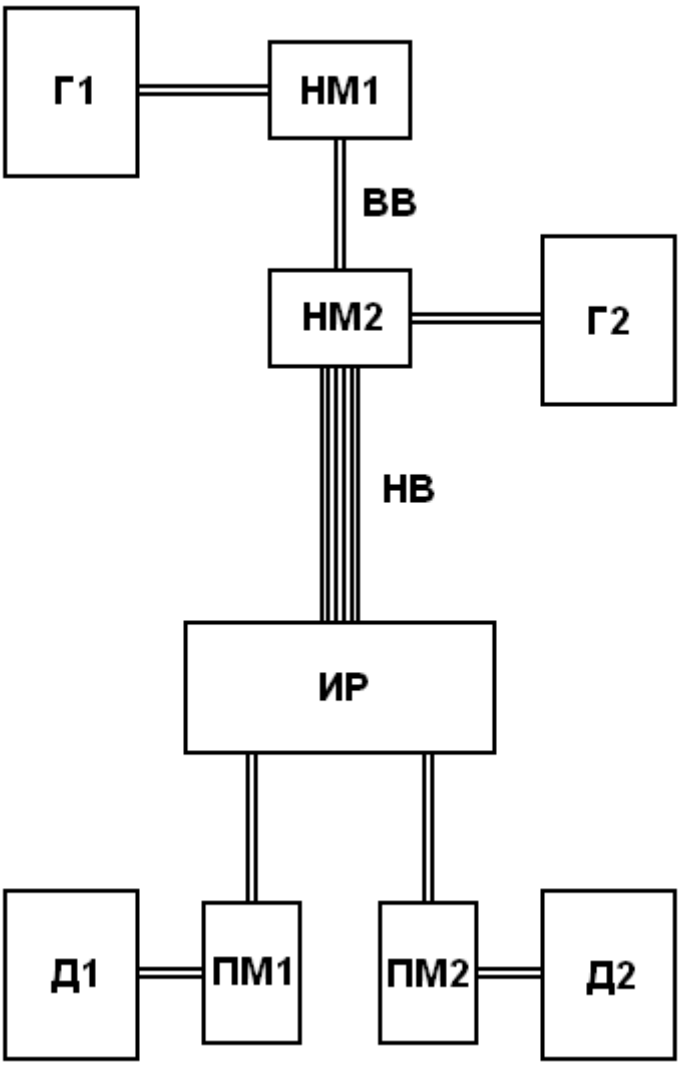

Рис. 1

На основе крутящего момента, скорости испытуемого редуктора и технологических режимов его работы определены силовые параметры приводных и нагрузочных мультипликаторов (редукторов), включая требуемые мощности электрических двигателей и генераторов.

Системой электропривода принята система тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-Д). Определены потери в электрических машинах и в механических элементах стенда в зависимости от режима его работы. Представлена энергетическая диаграмма стенда для одной пары «генератор - двигатель» (рис. 2), где учтены: $P_{СЕТИ}$ - мощность, потребляемая стендом из сети переменного тока; $\Delta P_{ТР}$ - потери в согласующем трансформаторе; $\Delta P_{ТП}$ - потери в тиристорном преобразователе; $P_{1Д}$ - электрическая мощность на входе двигателя; $\Delta P_{Д}$, $\Delta P_{ПМ}$ - потери в приводных двигателе и мультипликаторе; $\Delta P_{ИР}$ - потери в испытуемом редукторе, включающие в себя потери мощности в генераторе бортовой сети, поскольку они не возвращается в основной контур циркуляции мощности; $\Delta P_{НМ}$ - потери в нагрузочном

мультипликаторе; $P_{2НМ}$ - механическая мощность на выходе нагрузочного мультипликатора (мощность на входе генератора); $\Delta P_Г$ - потери в генераторе; $P_{1Г}$ - электрическая мощность на выходе генератора.

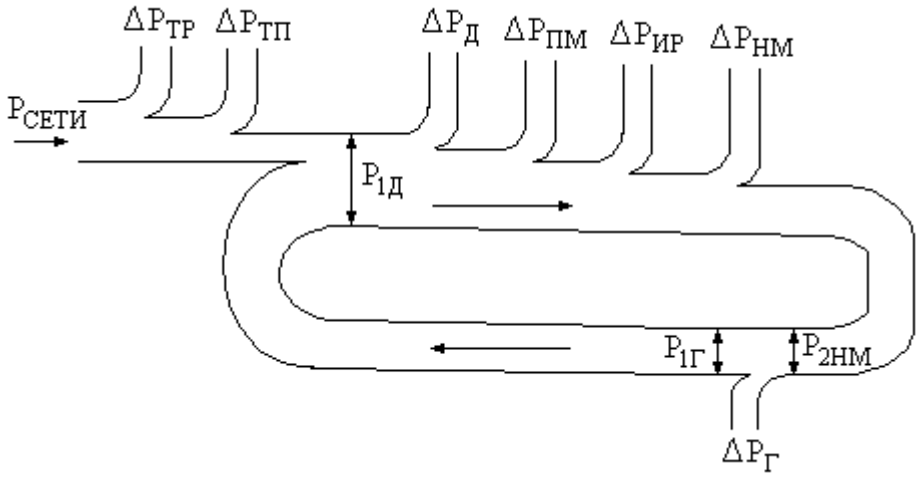

Рис. 2

Каждый из приводных электрогенераторов стенда должен выполнять две основных функции:

- функцию нагрузочной машины, работающей в длительном основном (взлётном) режиме;

- функцию двигателя, обеспечивающего вращение испытуемого редуктора, а также компенсацию потерь в элементах контура нагружения и штатных агрегатов, присоединенных к испытуемому редуктору в длительном режиме авторотации.

Следовательно, нагрузочные генераторы в режиме авторотации должны быть приводными двигателями и снабжены устройством, обеспечивающим их перевод в двигательный режим работы. Электродвигатели в режиме авторотации должны отключаться от источника питания и не должны создавать крутящего момента либо момента нагрузки.

На основании требований к комплексным испытаниям трансмиссий вертолетов сформулированы технологические и метрологические требования к электроприводу испытательного стенда и системам его управления.

Отклонение частоты вращения входных валов испытуемых редукторов от заданных значений в установившемся режиме приняты не более ±2,5% , а в переходных режимах – не более ±4% от максимального значения. Время восстановления частоты вращения – не более 30 с.

Система управления нагрузкой трансмиссии должна обеспечивать перегрузку в 40% от максимального значения крутящего момента во взлётном режиме.

Допустимая погрешность по постоянной составляющей нагрузочного крутящего момента в установившемся режиме не должна превышать ±2,5% от максимального значения.

Амплитуда переменной составляющей нагрузочных крутящих моментов не должна превышать на установившемся режиме ±2,5% от максимального значения постоянной составляющей. Амплитуда переменной составляющей крутящих моментов в переходных режимах не должна превышать ±4% от максимального значения крутящего момента. Величина виброперегрузок на входных валах главного редуктора не должна превышать 75 мм/с.

Система регулирования электропривода должна обеспечивать заданный темп плавного разгона стенда до номинальной частоты вращения, бесступенчатое регулирование и стабилизацию частоты вращения при изменении нагрузок, а также однодвигательный и двухдвигательный режимы работы с имитацией штатного запуска и раздельного опробования двигателей.

Должно обеспечиваться управление нагрузкой трансмиссии крутящими моментами валов верхнего и нижнего несущих винтов в соответствии с заданной циклограммой испытаний, стабилизация этих крутящих моментов в рабочих режимах и заданная динамика переходных процессов при изменении нагрузок.

Система управления электроприводом должна обладать демпфирующими свойствами, достаточными для подавления колебаний, обусловленных упругостями в механической части стенда.

Во второй главе рассмотрена кинематическая схема стенда для испытания трансмиссий вертолётов. Исходная кинематическая схема была преобразована к виду, представленному на рис. 3. Это пятимассовая механическая система с двумя суммарными приведёнными массами приводных двигателей ($J_{МД1}$ и $J_{МД2}$), двумя суммарными приведёнными массами нагрузочных генераторов ($J_{МГ1}$ и $J_{МГ2}$) и одной суммарной приведённой массой испытуемого редуктора ($J_{МИР}$). $C_{Д1}$ и $C_{Д2}$ - суммарные приведённые жёсткости первого и второго входных валов испытуемого редуктора соответственно; $C_{Г1}$ и $C_{Г2}$ - суммарные приведённые жёсткости первого и второго выходных валов испытуемого редуктора соответственно; $M_{СМД1}$ и $M_{СМД2}$ - суммарные моменты сопротивления трения, действующие на суммарные массы первого и второго двигателей соответственно; $M_{СМИР}$ - момент сопротивления, действующий на суммарную массу испытуемого редуктора; $M_{СМГ1}$ и $M_{СМГ2}$ - суммарные моменты сопротивления трения, действующие на суммарные массы первого и второго генераторов соответственно; $M_{Д1}$ и $M_{Д2}$ - электромагнитные двигательные моменты, создаваемые первым и вторым двигателями соответственно; $M_{Г1}$ и $M_{Г2}$ - электромагнитные тормозящие моменты, создаваемые первым и вторым генераторами соответственно.

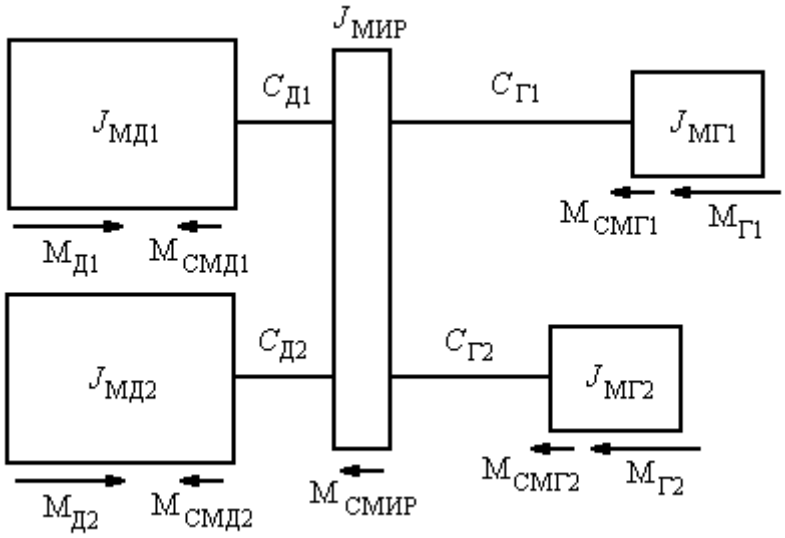

Рис. 3

Структурная схема кинематических связей стенда показана на рис. 6 в составе общей модели электропривода испытательного стенда.

На основании полученной модели был проведён анализ частотных свойств механической части, построены логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) переходных функций между различными точками системы. Так на рис. 4 приведены ЛАЧХ передаточной функции от момента приводного двигателя к скорости генераторов Г1 и Г2 с учётом диссипативных сил.

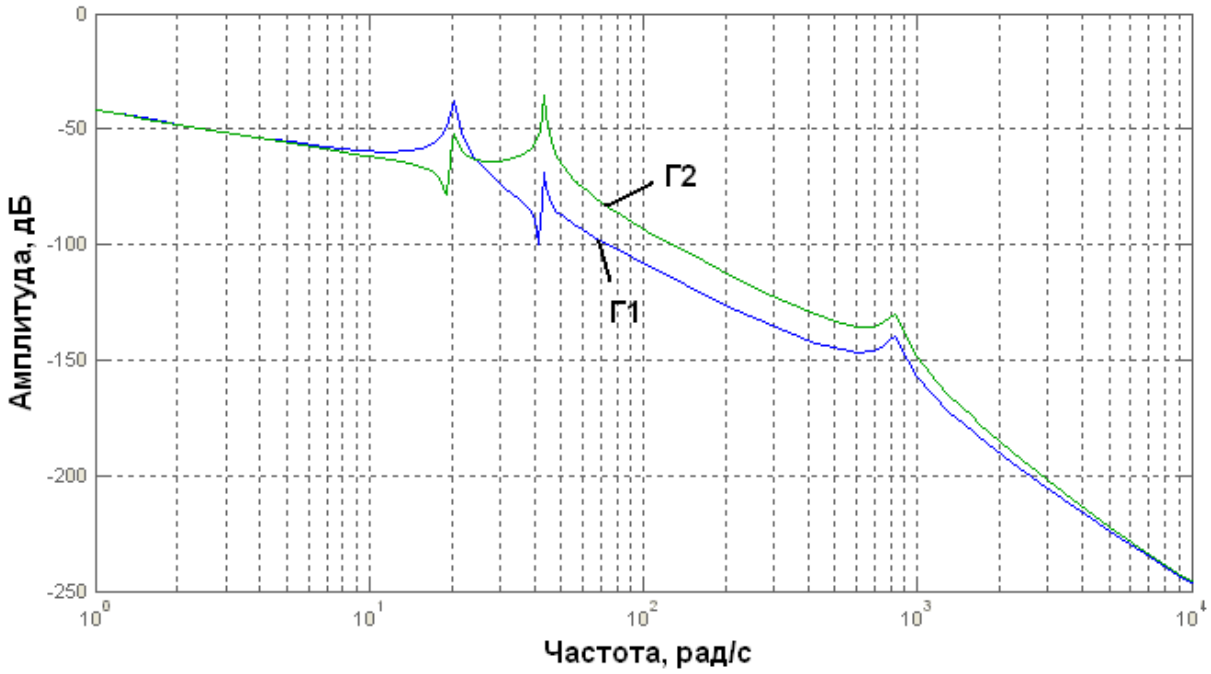

Рис. 4

Как видно из рис. 4, механическая часть испытательного стенда имеет резонансные частоты в районе 20 рад/с, 42 рад/с и 800 рад/с (~ 3 Гц, 7 Гц, и

127 Гц). На низких частотах механическая часть системы ведёт себя как интегрирующее звено с моментом инерции, равным суммарному приведённому моменту инерции всех элементов стенда.

Третья глава посвящена разработке математической модели силовой электрической части привода стенда при наличии в ней отсекающих вентилей, а также ее исследованию. Схема силовой электрической части электропривода стенда представлена на рис. 5. Она включает в себя: нереверсивные тиристорные преобразователи ТП1, ТП2; приводные двигатели Д1, Д2; нагрузочные генераторы Г1, Г2; отсекающие вентили V1 ÷ V4.

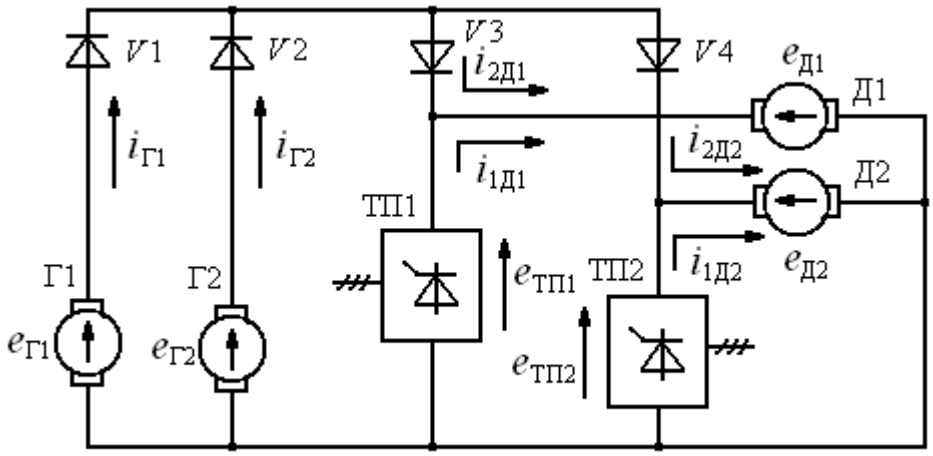

Рис. 5

Ток, протекающий через каждый из двигателей, определяется как сумма двух составляющих. Ток первого двигателя: $i_{Д1} = i_{1Д1} + i_{2Д1}$, где $i_{1Д1}$ - составляющая тока двигателя Д1 от тиристорного преобразователя ТП1, $i_{2Д1}$ - составляющая тока двигателя Д1 от генераторов. Ток второго двигателя: $i_{Д2} = i_{1Д2} + i_{2Д2}$, где $i_{1Д2}$ - составляющая тока двигателя Д2 от тиристорного преобразователя ТП2, а $i_{2Д2}$ - составляющая тока двигателя Д2 от генераторов. При этом также $i_{1Д1} = i_{ТП1}$, а $i_{1Д2} = i_{ТП2}$, поскольку ток от тиристорноного преобразователя не может протекать через диоды, и оба тиристорных преобразователя являются нереверсивными.

Поскольку последовательно с каждым из генераторов установлен диод, то ток генератора может течь только в одном направлении и только в случае положительного напряжения анод - катод на диоде.

Значения токов $I_{1Д1}$, $I_{1Д2}$ $I_{2Д1}$, $I_{2Д2}$ в операторной форме:

$$I_{1Д1}(p) = \frac{E_{ТП1}(p) - E_{Д1}(p)}{Z_{Д1}(p) + Z_{ТП1}(p)};\ I_{1Д2}(p) = \frac{E_{ТП2}(p) - E_{Д2}(p)}{Z_{Д2}(p) + Z_{ТП2}(p)}.$$

$$I_{2Д1}(p) = \frac{U_{Г}(p) - E_{Д1}(p)}{Z_{Д1}(p)};\ I_{2Д2}(p) = \frac{U_{Г}(p) - E_{Д2}(p)}{Z_{Д2}(p)}.$$

Здесь: $E_{ТП1}$, $E_{ТП2}$ - ЭДС на выходе преобразователей ТП1 и ТП2; $E_{Д1}$, $E_{Д2}$ - противоЭДС двигателей Д1 и Д2; $U_Г$ - напряжение на параллельно включенных генераторах; $Z_{Д1} = L_{Д1}p + R_{Д1}$, $Z_{Д2} = L_{Д2}p + R_{Д2}$ - операторные сопротивления якорных цепей двигателей; $Z_{ТП1} = L_{ТП1}p + R_{ТП1}$, $Z_{ТП2} = L_{ТП2}p + R_{ТП2}$ - операторные сопротивления тиристорных преобразователей.

Структурная схема электрической части стенда показана на рис. 7 в составе общей модели электропривода испытательного стенда.

Четвёртая глава посвящена разработке систем управления приводными электродвигателями и нагрузочными электрогенераторами испытательного стенда. На рис. 6 представлена обобщенная модель электропривода испытательного стенда, включающая в себя модель механической части, модель силовой электрической части и модель систем управления отдельными электрическими машинами. Модель силовой электрической части более подробно показана на рис. 7. Модель силовой электрической части включает в себя нелинейные блоки переключателей (Switch), а так же релейные блоки, моделирующие свойства электрических вентилей (диодов и тиристоров). Аргумент некоторых передаточных функций (оператор *p*) в целях упрощения на рис.7 не отражен.

Блок *Switch* $U_Г$ определяет величину напряжения на параллельно включённых нагрузочных генераторах. Блоки *Switch* $I_{Г1}$ и *Switch* $I_{Г2}$ определяют токи якоря генераторов Г1 и Г2 в зависимости от разницы между напряжениями $U_{Г1}$ и $U_{Г2}$ на якорях генераторов. Релейные блоки *Relay1* ÷ *Relay4* определяют возможность или невозможность прохождения составляющих токов двигателей: $I_{1Д1}$, $I_{1Д2}$, $I_{2Д1}$, $I_{2Д2}$.

Управление скоростью каждого из приводных двигателей обеспечивается двухконтурной системой подчинённого регулирования с внутренним контуром тока якоря и внешним контуром скорости. Система регулирования момента каждого из нагрузочных генераторов также двухконтурная: с внутренним контуром тока возбуждения генератора и внешним контуром упругого момента на валу генератора. На рис. 7: $U_{ЗСД1}$, $U_{ЗСД2}$ - сигналы задания скорости двигателей Д1 и Д2; $U_{ЗМГ1}$, $U_{ЗМГ2}$ - сигналы задания момента нагрузки генераторов Г1 и Г2; $W_{РСД1}$, $W_{РСД2}$ - передаточные функции регуляторов скорости двигателей Д1 и Д2; $W_{РТД1}$, $W_{РТД2}$ - передаточные функции регуляторов тока якоря двигателей Д1 и Д2; $W_{РМГ1}$, $W_{РМГ2}$ - передаточные функции регуляторов упругого момента на валах генераторов Г1 и Г2; $W_{РТВГ1}$, $W_{РТВГ2}$ - передаточные функции регуляторов тока возбуждения генераторов Г1 и Г2. Все регуляторы выбраны пропорционально - интегральными.

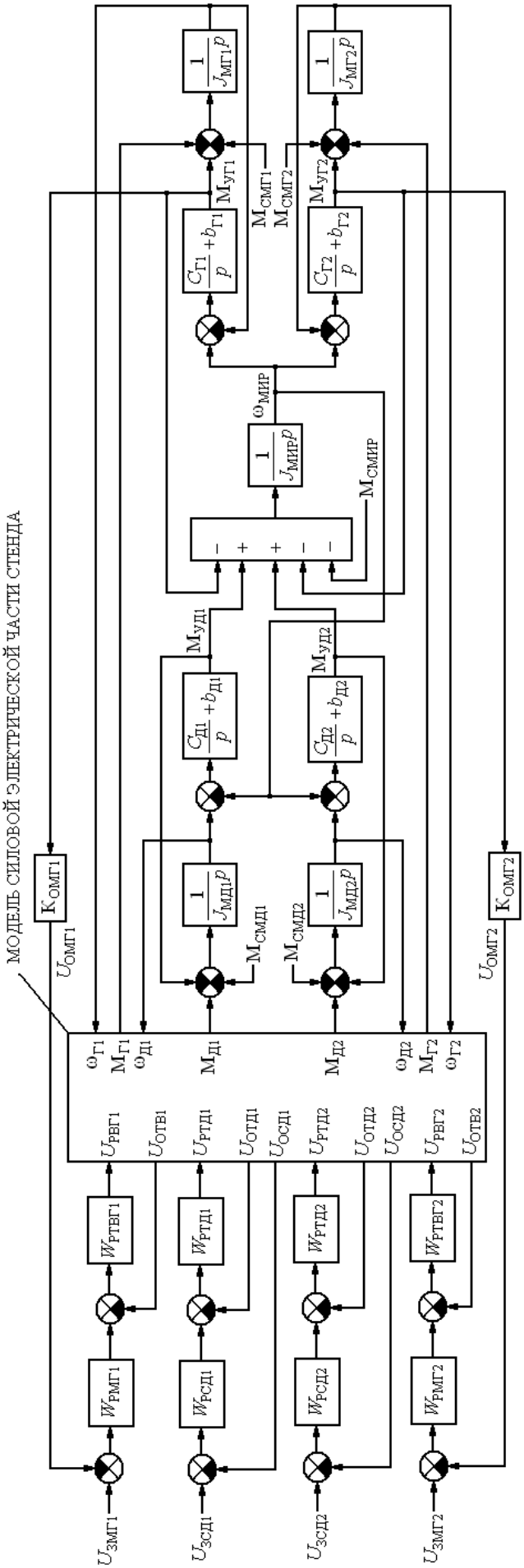
МОДЕЛЬ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЧАСТИ СТЕНДА
$K_{ОМГ1}$
$K_{ОМГ2}$
$U_{ОМГ1}$
$U_{ОМГ2}$
$\frac{1}{J_{МГ1}p}$
$\frac{1}{J_{МГ2}p}$
$M_{УГ1}$
$M_{УГ2}$
$M_{СМГ1}$
$M_{СМГ2}$
$\frac{C_{Г1}}{p}+b_{Г1}$
$\frac{C_{Г2}}{p}+b_{Г2}$
$\omega_{МИР}$
$\frac{1}{J_{МИР}p}$
$M_{СМИР}$
$M_{УД1}$
$M_{УД2}$
$\frac{C_{Д1}}{p}+b_{Д1}$
$\frac{C_{Д2}}{p}+b_{Д2}$
$\frac{1}{J_{МД1}p}$
$\frac{1}{J_{МД2}p}$
$M_{СМД1}$
$M_{СМД2}$
$\omega_{Г1}$ $M_{Г1}$ $\omega_{Д1}$ $M_{Д1}$ $M_{Д2}$ $\omega_{Д2}$ $M_{Г2}$ $\omega_{Г2}$
$U_{РВГ1}$ $U_{ОТВ1}$ $U_{РТД1}$ $U_{ОТД1}$ $U_{ОСД1}$ $U_{РТД2}$ $U_{ОТД2}$ $U_{ОСД2}$ $U_{РВГ2}$ $U_{ОТВ2}$
$W_{РТВГ1}$ $W_{РТД1}$ $W_{РТД2}$ $W_{РТВГ2}$
$W_{РМГ1}$ $W_{РСД1}$ $W_{РСД2}$ $W_{РМГ2}$
$U_{ЗМГ1}$ $U_{ЗСД1}$ $U_{ЗСД2}$ $U_{ЗМГ2}$

Рис. 6

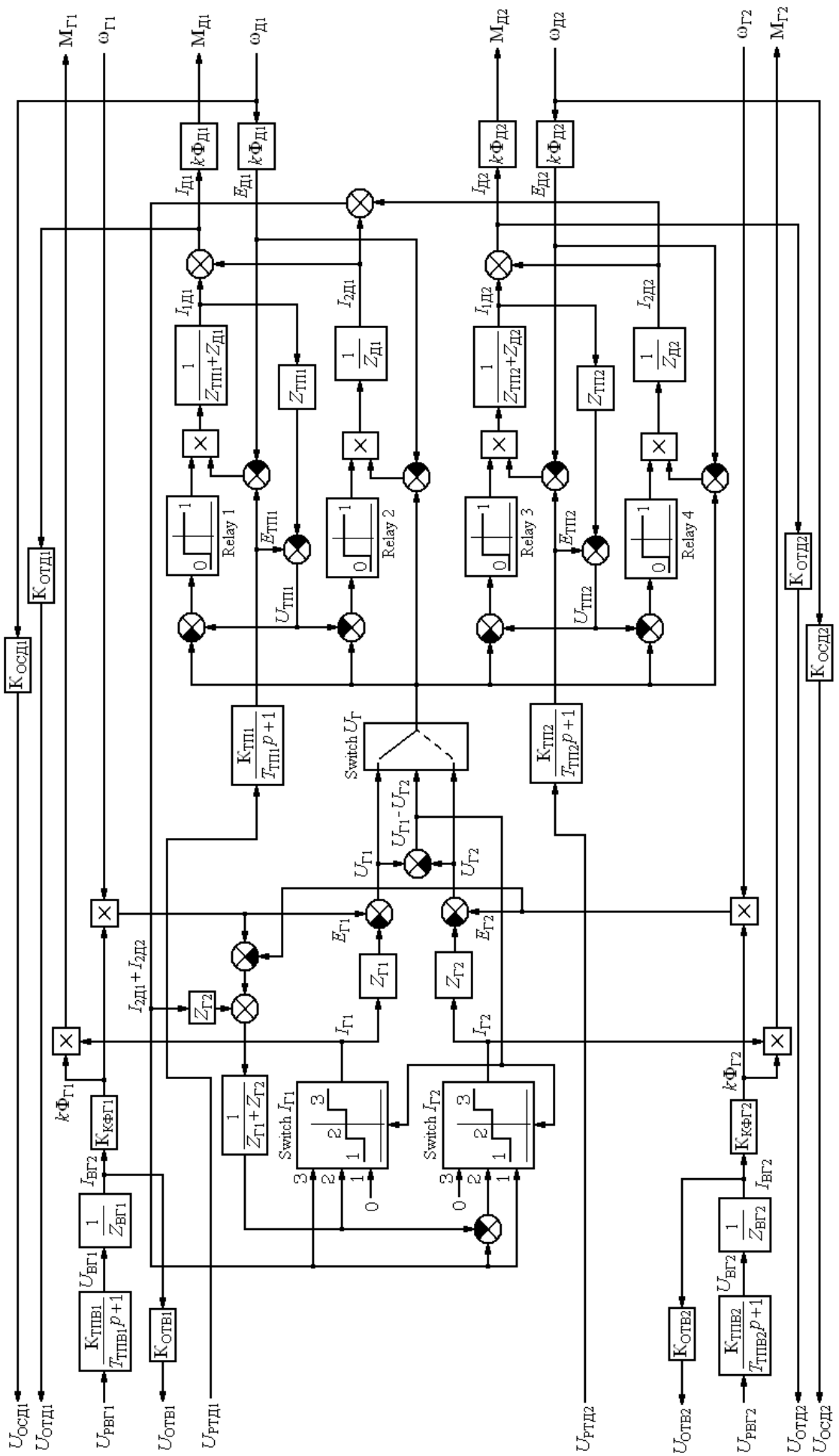
Relay 1
Relay 2
Relay 3
Relay 4
Switch $U_Г$
Switch $I_{Г1}$
Switch $I_{Г2}$

Рис. 7

На основе ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы управления координатами электропривода стенда были определены параметры регуляторов всех контуров их регулирования, обеспечивающие минимальную величину упругих колебаний без ухудшения переходных процессов в приводе. Все логарифмические характеристики строились для линеаризованной системы управления.

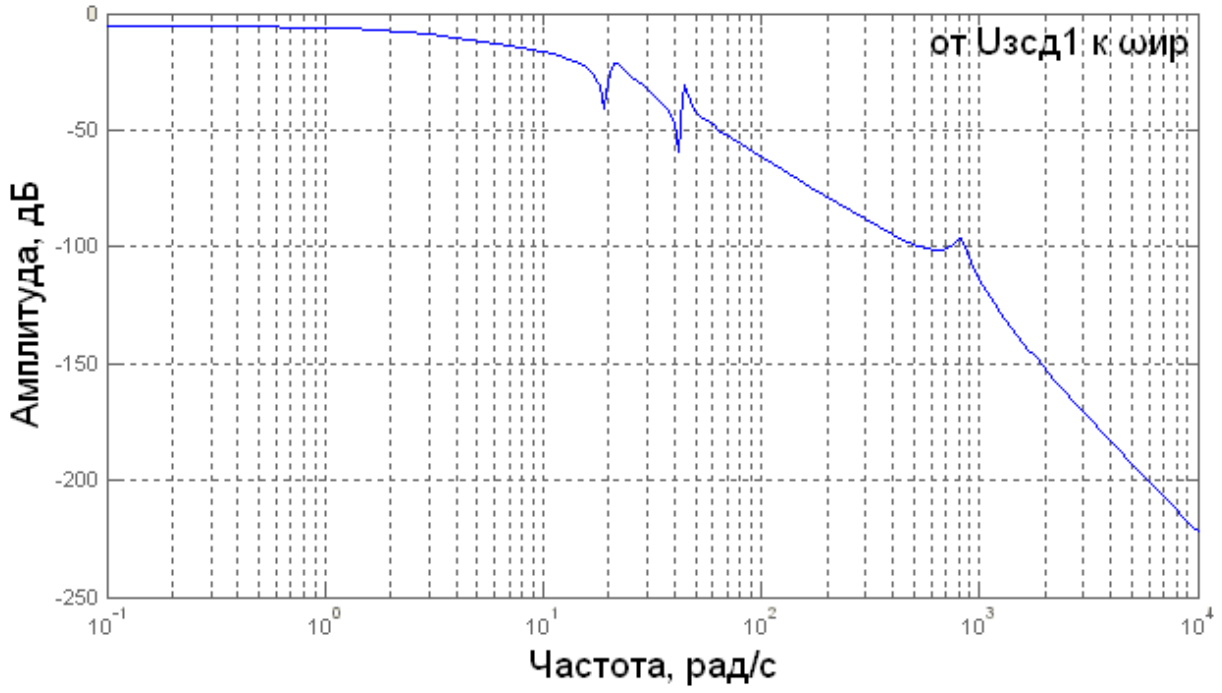

Рис. 8

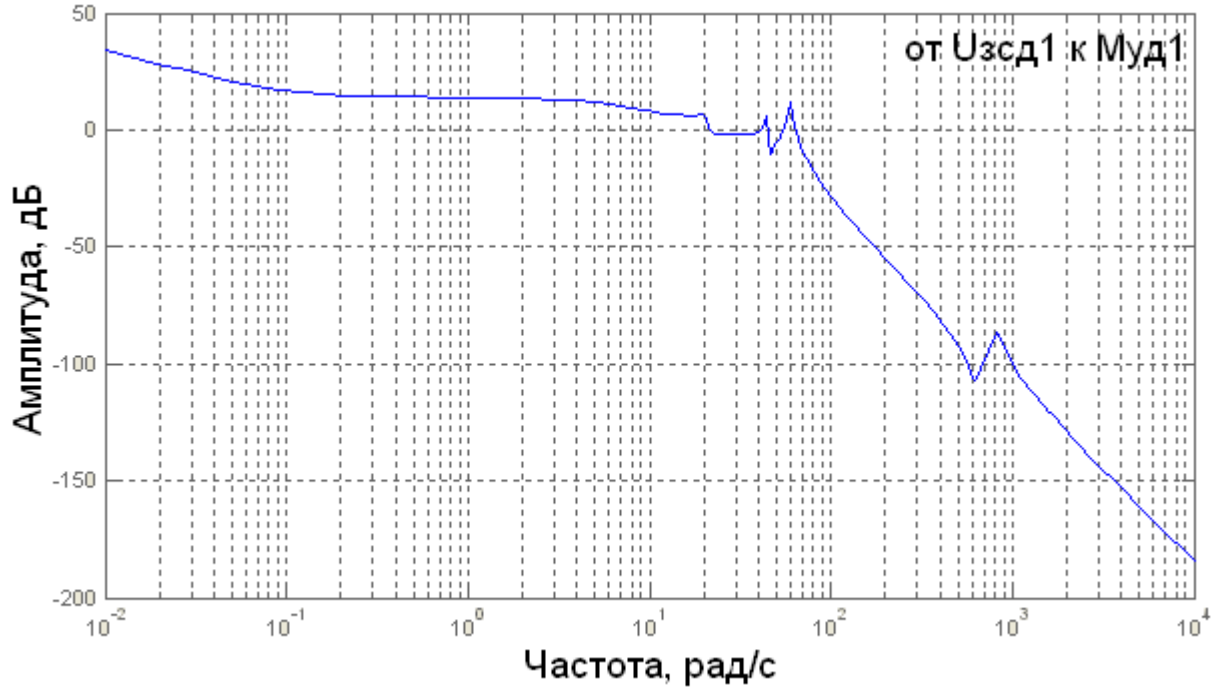

Рис. 9

На рис.8, 9 представлены ЛАЧХ замкнутой системы управления электроприводом стенда, где входным сигналом является сигнал задания скорости двигателя, а выходным – скорость испытуемого редуктора (рис. 8) и упругий момент на его входном валу (рис. 9). На характеристиках рис. 8 имеются «всплески» на частотах 20, 42 и 800 рад/с, а на рис.9 на частотах 20, 42, 60 и 800 рад/с, обусловленные наличием упругих элементов в механической части привода стенда. При этом относительные колебания скорости меньше, чем для момента.

В связи с возможным изменением параметров механической части испытательного стенда важно оценить, насколько тот или иной ее параметр оказывает влияние на динамические свойства электропривода стенда. Для этого использовалась чувствительность $S_b^{W(p)}(p)$ передаточной функции $W(p)$ системы управления электроприводом к изменению его технологического параметра b:

$$S_b^{W(p)}(p) = \frac{\partial W(p)}{\partial b} \cdot \frac{b}{W(p)}.$$

При структурно – топологическом методе ее определения система управления представлялась в форме графа, где каждое ее звено отражалось в виде ребра с передаточной функцией звена, а входные и выходные переменные этих звеньев - в виде узлов. Чувствительность передаточной функции системы между входной и выходной точками графа к изменению параметра b с применением структурно – топологического метода определена как:

$$S_b^{W(p)}(p) = \frac{\partial \sum\limits_K W_K(p) \cdot \Delta_K(p)}{\partial b} \cdot \frac{b}{\sum\limits_K W_K(p) \cdot \Delta_K(p)} - \frac{\partial \Delta(p)}{\partial b} \cdot \frac{b}{\Delta(p)},$$

где $W_K(p)$ - передаточная функция к-го прямого пути от входной точки к выходной точке графа; $\Delta_K(p)$ - к-й минор определителя системы, полученной из исходной путём удаления всех рёбер, входящих и исходящих из узлов, лежащих на к-м прямом пути от входной точки к выходной точке графа; $\Delta(p) = 1 - \sum\limits_i W_{0i}(p) + \sum\limits_{ij} W_{0i}(p) W_{0j}(p) - \sum\limits_{ijl} W_{0i}(p) W_{0j}(p) W_{0l}(p) + \ldots$ - определитель системы; $W_{0i}(p)$ - передаточные функции линейно независимых контуров графа, где любой из контуров содержит такое ребро, которое отсутствует в других контурах; $W_{0i}(p)$ и $W_{0j}(p)$ - передаточные функции пар контуров, несоприкасающихся рёбрами; $W_{0i}(p)$, $W_{0j}(p)$ и $W_{0l}(p)$ - передаточные функции троек контуров, несоприкасающихся рёбрами и т. д.

В качестве входной точки системы было принято задание скорости двигателя, а в качестве выходных точек – электромагнитный момент двигателя либо упругий момент на его валу. На рис. 10 приведены ЛАЧХ функций чувствительности системы к изменению момента инерции массы первого приводного двигателя. Из характеристик видно, что чувствительность системы с выходом по электромагнитному моменту двигателя стремится к нулю (к -∞ в логарифмическом масштабе) как на высоких частотах, так и на низких, а чувствительность системы с выходом по упругому моменту на высо-

ких частотах стремится к единице (к 0 в логарифмическом масштабе). Проверка правильности нахождения функций чувствительности была проведена путём построения ЛАЧХ собственно системы: исходной и при изменении соответствующего параметра.

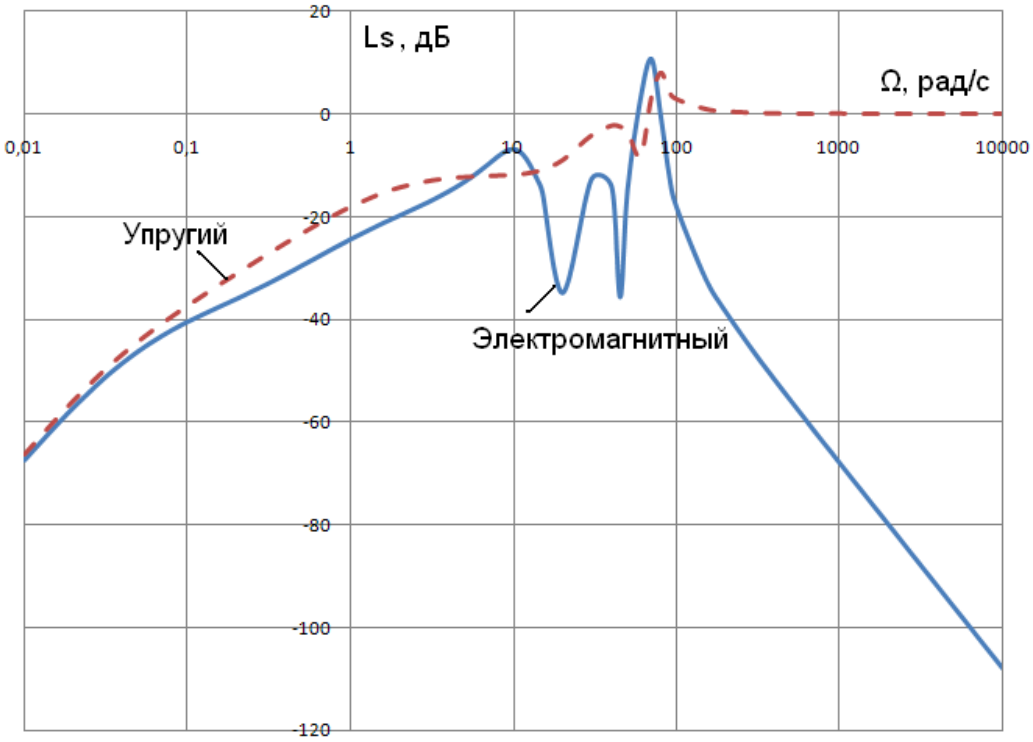

Рис. 10

На примере функций чувствительности к изменению моментов инерции масс приводного двигателя ($S_{JМД1}$), нагрузочного генератора ($S_{JМГ1}$), испытуемого редуктора ($S_{JМИР}$), а также упругостей, соединяющих массы приводного двигателя ($S_{СД1}$) и нагрузочного генератора ($S_{СГ1}$) с массой испытуемого редуктора, можно рассмотреть методику диагностирования систем управления электроприводами испытательного стенда.

Для логического сравнения различной реакции поведения замкнутой системы электропривода стенда на тестовые гармонические возмущения с характерными частотами, функции чувствительности преобразовываются к логической форме представления. Чувствительность передаточных функций к отклонению параметра показывает, насколько изменился динамический коэффициент передачи $K(\Omega_1)$ между входной и выходной точками системы при изменении данного параметра. Если чувствительность стремится к единице, то изменение коэффициента K на частоте Ω_1 существенно, если чувствительность стремится к нулю, то несущественно. Примем, что если чувствительность $S_b(\Omega_1) \geq 0{,}6$, то $\Delta K(\Omega_1)$ существенно и новой логической переменной $R_b(\Omega_1)$ присваивается значение «1». Если же $0 \leq S_b(\Omega_1) \leq 0{,}2$, то $\Delta K(\Omega_1)$ несущественно и $R_b(\Omega_1)$ присваивается значение «0». Если чувствительность лежит в пределах $0{,}2 \leq S_b(\Omega_1) \leq 0{,}6$, то значение $R_b(\Omega_1)$ не анализируется. В табл.1 представлены логические значения функций чувствительности $R_{JМД1}$,

$R_{JМИР}$, $R_{JМГ1}$, $R_{СД1}$, $R_{СГ1}$ на тестовых частотах 0,1; 10; 500 рад/с для передаточной функции от сигнала задания на скорость первого двигателя до упругого момента на валу первого двигателя.

Таблица 1

Ω, рад/с	$R_{JМД1}$	$R_{JМИР}$	$R_{JМГ1}$	$R_{СД1}$	$R_{СГ1}$
0,1	0	1	1	0	0
10	0	1	0	0	0
500	1	1	0	1	0

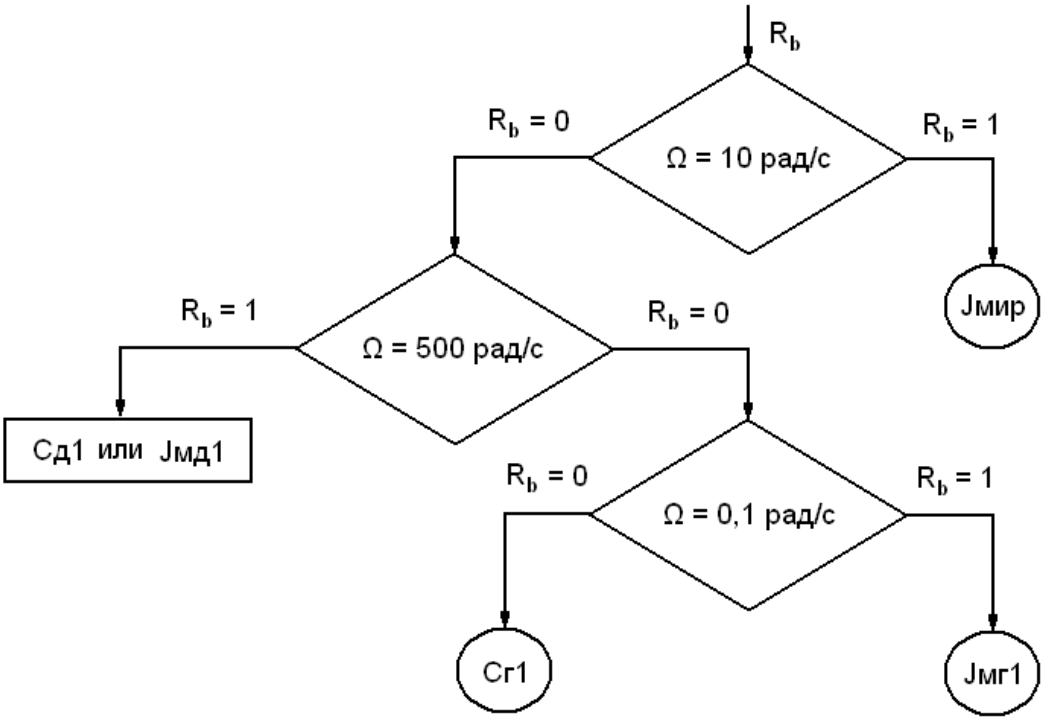

Рис. 11

Пример алгоритма диагностирования механической части испытательного стенда дан на рис. 11. Для выявления отклонения $J_{МИР}$ от первоначального значения достаточно, чтобы логическое значение чувствительности системы (от задания скорости к упругому моменту) на частоте 10 рад/с было равно единице. Это означает, что амплитуда сигнала на выходе системы изменилась существенно и, следовательно, существенно изменился динамический коэффициент передачи системы. Для выявления отклонения $J_{МГ1}$ достаточно, чтобы логическое значение чувствительности системы было равно нулю на частоте 10 рад/с, равно нулю на частоте 500 рад/с и равно единице на частоте 0,1 рад/с. Для выявления отклонения $C_{Г1}$ достаточно, чтобы логическое значение чувствительности системы было равно нулю на частоте 10 рад/с, равно нулю на частоте 500 рад/с и равно нулю на частоте 0,1 рад/с. Если логическое значение чувствительности равно нулю на частоте 10 рад/с и

равно единице на частоте 500 рад/с, то причина изменения свойств системы в изменении $C_{Д1}$ или $J_{МД1}$, так как логические функции чувствительности к последним двум параметрам неразличимы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Определены основные технологические требования к электроприводу стенда для испытания вертолетного редуктора. На основе технологической части стенда для испытания вертолетного редуктора, кинематических его параметров и режимов работы определены мощности приводных и нагрузочных электромашин стенда.

2. Представлена силовая электрическая часть привода стенда на основе машин постоянного тока, отличающаяся высокой энергетической эффективностью за счет обмена энергией между приводными и нагрузочными электродвигателями стенда и обеспечивающая потребление из сети лишь энергии, необходимой для покрытия потерь мощности в элементах стенда. Определены зависимости потерь мощности в силовых элементах стенда от технологических режимов его работы.

3. Впервые разработана математическая модель механической части привода стенда как пятимассовой системы и определены параметры ее структурной схемы. Для исследования статических и динамических свойств механической части привода стенда ее математическая модель представлена в программе Simulink Matlab с учетом диссипативных сил трения в механических узлах стенда.

4. На основе разработанной математической модели механической части привода определены ЛАЧХ и ЛФЧХ передаточных функций между электромагнитными моментами приводных двигателей; скоростями приводных генераторов и испытуемого редуктора; упругими моментами на выходных валах испытуемого редуктора как во взлётном режиме, так и в режиме авторотации. Определены резонансные частоты механической части испытательного стенда: 3 Гц, 7 Гц, 127 Гц.

5. Впервые в программе Simulink Matlab разработана математическая модель силовой электрической части привода с учетом отсекающих диодов в цепях питания электрических машин стенда.

6. На основе математических моделей механической и электрической частей привода испытательного стенда дан анализ динамических свойств их переменных в разомкнутой системе управления. Доказана необходимость применения замкнутой системы управления электроприводом стенда с целью исключения в нем недопустимых колебаний моментов и скоростей привода, обусловленных наличием в приводе упругих механических звеньев.

7. Впервые разработана обобщенная модель электропривода испытательного стенда, включающая в себя модели силовой электрической и механической частей привода и замкнутой системы их управления. Определены и дан анализ ЛАЧХ и ЛФЧХ контуров регулирования координат электропривода стенда в разомкнутой и замкнутой системах управления. На их основе

рекомендованы параметры регуляторов координат привода, обеспечивающие желаемое качество переходных процессов координат. Исследованы переходные свойства замкнутой системы электропривода стенда, подтверждающие работоспособность привода.

8. Разработан граф системы управления приводными двигателями стенда и на его основе структурно – топологическим методом дан анализ чувствительности передаточных функций системы управления к изменению параметров механической части стенда и пример алгоритма диагностирования замкнутой системы электропривода стенда.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Иванов Г. М., Новиков В. И., Осипов О. И., Холин А. В. Электропривод стенда для испытаний силовой трансмиссии вертолётов. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 3 с. 107-112.

2. Осипов О. И., Холин А. В., Чикин М. А. Энергосберегающий электропривод стенда для испытания трансмиссий; тез. доклада // Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика. // Шестнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. - М.: Издательство МЭИ, 2010, т.2., с. 156-157.

3. Осипов О. И., Холин А. В. Энергосберегающий электропривод стенда для испытаний трансмиссий. // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып.685. – М.: Издательство МЭИ, 2009., с. 40-45.

4. Осипов О. И., Холин А. В. Анализ динамики электропривода стенда для испытаний силовой трансмиссии вертолётов. // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып.686. – М.: Издательство МЭИ, 2010., с. 53-61.

5. Осипов О. И., Холин А. В. Выбор параметров системы управления испытательного стенда. // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып.687. – М.: Издательство МЭИ, 2011, с. 9-13.

6. Осипов О. И., Холин А. В. Чувствительность системы регулирования натяжения корда к изменению её параметров; тез. доклада. Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика. // Пятнадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов: Тез. докл. в 3-х т. - М.: Издательство МЭИ, 2009, т.2., с. 142-143.

7. Иванов К. А., Осипов О. И., Холин А. В. Чувствительность системы регулирования натяжения корда к изменению её параметров. // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып.684. – М.: Издательство МЭИ, 2009, с. 10-17.