

На правах рукописи
Кононова

Кононова Мария Евгеньевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СЛЕДЯЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ОПОРНО-ПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ БОЛЬШИХ ТЕЛЕСКОПОВ**

Специальность 05.13.05 - «Элементы и устройства вычислительной техники и систем
управления»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2016г.

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) кафедры Электротехники и прецизионных электромеханических систем.

Научный руководитель к.т.н. Никитина Мария Владимировна

Официальные оппоненты: Самосейко Вениамин Францевич,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Электропривода и
электрооборудования береговых установок»
государственного университета морского и
речного флота имени адмирала С.О. Макарова

Шамберов Владимир Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, профессор
кафедры «Судовая автоматика и измерения»
Санкт-Петербургского государственного
морского технического университета

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И.
Ленина»

Защита состоится 29 декабря 2016 г. в 19 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.227.03, на базе Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) по адресу: г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49, ауд. 331.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д. 49 и на сайте http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=137920

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.227.03
доктор технических наук, профессор

Коняхин И.А.

Актуальность темы исследования

Системы наведения комплексов высокоточных оптических измерений, использующие сервоприводы, разрабатываемые на кафедре ЭТ и ПЭМС Униерситета ИТМО, предназначены для преобразования кодов задания траектории движения оптической оси телескопов, поступающих либо от центральной ЭВМ, либо от телевизионных автоматов (ТА), либо и от ЭВМ, и от ТА в углы поворота следящих осей, чаще всего по двум координатам – углу места и азимуту.

Для управления угловым положением оптической оси в пространстве оптический телескоп устанавливается в опорно-поворотное устройство (ОПУ), имеющее, как правило, две оси вращения: азимутальную и угломестную. ОПУ вместе с электроприводами, решающие задачу совмещения оптической оси телескопа с линией визирования наблюдаемого движущегося объекта или задачу пространственной стабилизации поля зрения телескопа и оптического изображения в его фокальной плоскости, должны обеспечивать уникально высокое качество наведения.

В задачах, требующих обнаружения объектов с предельно слабым блеском, для обеспечения длительных экспозиций (от единиц секунд до нескольких минут) точность удержания оптической оси в пространстве не должна превышать половину угловой секунды в течение времени экспозиции. В задачах сопровождения движущихся космических объектов часто требуется, чтобы динамическая погрешность сопровождения не превышала одной угловой секунды при скоростях смещения объекта от нескольких угловых секунд в секунду до 10 градусов в секунду и более.

Указанное качество наведения должно обеспечиваться при вращающихся массах от нескольких десятков килограмм (малые телескопы) до нескольких десятков тонн (большие телескопы) при наличии возмущающих неравномерных моментов от сил вязкого и сухого трения, в том числе, в подшипниковых узлах, кабельном переходе, переменных (зубцовых) моментов электродвигателя, ветровых и динамических нагрузок, и с учетом конечной жесткости конструкции

ОПУ и ее резонансных частот. В связи со всем вышесказанным к основным проблемам, возникающим при создании следящих электроприводов комплексов высокоточных оптических измерений, относятся:

- необходимость обеспечения широкого диапазона (до 18000) скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок (1-2 угловые секунды);

- необходимость обеспечения плавного движения оптической оси комплекса при инфранизких скоростях слежения (до единиц угловых секунд за секунду) в условиях нежесткости конструкции ОПУ и возможности возникновения механического резонанса на частотах от единиц до нескольких десятков Гц.

В решении подобных задач важную роль играет конструктивное исполнение всех элементов измерительного телескопа и, в первую очередь, механизмов осей его ОПУ. Низкие резонансные частоты (от долей до единиц Гц для больших телескопов) в конечном итоге определяют полосу пропускания частот контуров регулирования системы управления и, как следствие, ее динамическую точность.

В этих условиях, именно на сервопривод возлагается задача компенсировать все возможные несовершенства конструкции механических узлов телескопа и обеспечить заданную точность.

Степень разработанности темы исследования

В работах Бесекерского В.А., Чемоданова Б.К., Ключева В.И., Башарина А.В., Соколовского Г.Г., Борцова Ю.А., Самосейко В.Ф., Сабина Ю.А. и др. освещены вопросы анализа, синтеза следящих электроприводов с жесткими и нежесткими исполнительными осями. При этом структурные решения и методики синтеза систем управления ориентированы, в основном, на электроприводы, механизмы исполнительных осей которых представляемы двухмассовыми математическими моделями. Такой подход оказывается неприменимым к системам управления электроприводов больших телескопов с многомассовыми исполнительными осями.

Кроме того, указанные работы посвящены в основном однодвигательным приводам, хотя использование двух двигателей на обоих полуосях вилки

телескопа может дать выигрыш как с позиции снижения массо-габаритных показателей конструкции ОПУ при использовании двигателей меньшей мощности, так и повышения динамических качеств следящих электроприводов.

Повышение требований к точности квантово-оптических комплексов нового поколения выдвигают новые задачи по проектированию и исследованию. В этом плане *разработка новых структур и новых подходов к определению параметров регуляторов систем управления приводов, направленных на повышение динамической точности в условиях многомассовости конструкции их исполнительных осей, являются актуальными задачами.*

Решение этих задач требует изучения свойств многомассовых механизмов исполнительных осей больших телескопов как элементов прецизионных электромеханических систем, обуславливающих в конечном итоге структурные решения и методики синтеза систем управления следящих электроприводов систем наведения.

Цель диссертационной работы

Целями диссертации являются разработка новых структур и подходов к определению параметров регуляторов систем управления приводов, направленных на повышение динамической точности следящих электроприводов в условиях многомассовости конструкций механизмов их исполнительных осей.

Достижение поставленной цели потребовало решения следующих задач:

1) Разработка математических моделей многомассовых механизмов осей ОПУ систем наведения телескопов комплексов траекторных измерений, *адаптированных к решению задач синтеза систем управления следящих электроприводов.*

2) Моделирование и анализ электромеханических переходных процессов в энергетических подсистемах следящих электроприводов с исполнительными осями, механизмы которых представляемы трехмассовыми моделями разветвленного и неразветвленного типов.

3) Разработка структур, математических моделей и методов определения параметров регуляторов систем управления однодвигательных и

двухдвигательных следящих электроприводов с трехмассовыми исполнительными осями.

4) Формирование рекомендаций по выбору элементной базы основных узлов следящих электроприводов с выбранными структурами из условия обеспечения заданных требований к точности в типовых режимах слежения.

5) Экспериментальное исследование элементов энергетических подсистем.

Научная новизна работы

Новизна и теоретическая значимость результатов работы состоят в следующем:

1) Предложены новые векторно-матричные математические модели трехмассовых механизмов разветвленного и неразветвленного типов, *адаптированные к решению задач синтеза систем управления следящих электроприводов осей ОПУ.*

2) Предложены новые структуры систем управления следящих электроприводов, обусловленные свойствами многомассовости конструкций исполнительных осей ОПУ.

3) Предложены аналитические соотношения для расчета параметров регуляторов систем управления следящим электроприводом с многомассовыми исполнительными осями, правомерность которых подтверждена результатами моделирования.

Практическая ценность

Разработанные инженерные методы синтеза позволяют обоснованно подходить к проектированию систем управления, с учетом специфики электромеханических переходных процессов в энергетических подсистемах следящих электроприводов осей ОПУ и обеспечить заданные требования к точности систем наведения больших телескопов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач использовались методы теории автоматического управления, методы теории электрических цепей, методы теории

электропривода, методы математического моделирования сложных систем в средах *MATLAB/SIMULINK* и *Mathcad*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Векторно-матричные математические модели трехмассовых механизмов разветвленного и неразветвленного типов, как элементов систем управления следящих осей.

2. Структуры систем управления однодвигательных и двухдвигательных следящих электроприводов с трехмассовыми механизмами исполнительных осей ОПУ.

3. Аналитические соотношения для расчета параметров регуляторов однодвигательных и двухдвигательных следящих электроприводов с трехмассовыми исполнительными осями.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы обеспечивается строгостью используемых математических методов, совпадением результатов численных расчетов и моделирования с *экспериментальными* данными.

Реализация результатов работы

Приведенные в работе методы и подходы к проектированию системы управления электропривода телескопа применялись:

1) в рамках выполнения х/д НИР №№ 212212, 211144, 212187, проводимых по заказу ОАО Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения».

2) в учебном процессе при подготовке студентов по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электропривод и автоматика» в рамках дисциплин «Основы управления электромеханическими системами» и «Электропривод в современных технологиях».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XL, XLI, XLII, XLIII, XLIV научных и учебно-методических конференциях Университета ИТМО 2011-2015 годов соответственно, I, II, III Всероссийских конгрессах молодых ученых в 2011-2015 годов

соответственно. Результаты были представлены также VIII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 (Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 8 статьях, 3 из которых в журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, списка литературы, включающего 67 источников, а также списка сокращений, принятого в работе. Основная часть работы изложена на 119 страницах машинописного текста. В работу включены 55 рисунков и 2 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность выполненной работы, сформулирована ее цель. Отражены научные результаты и положения, выносимые на защиту, а также практическая значимость результатов диссертационной работы.

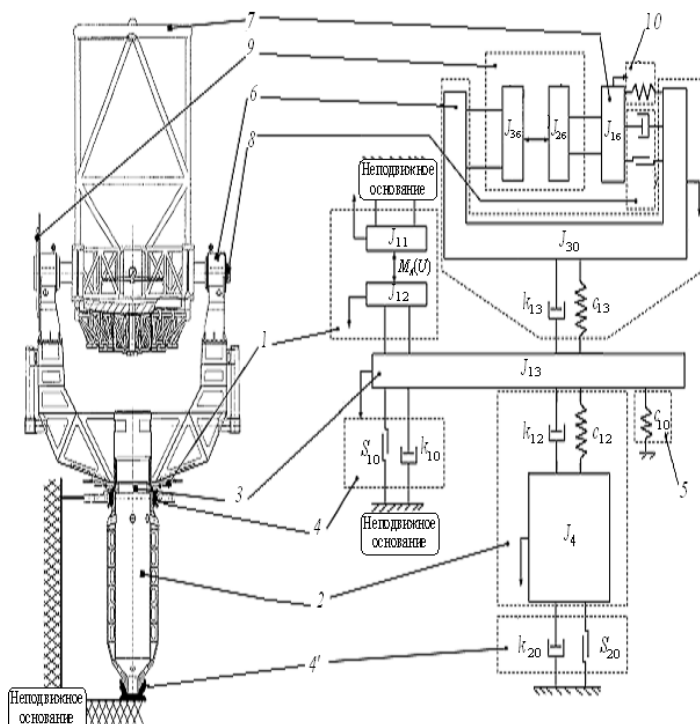


Рисунок 1

В **первой** главе детализировано представлены механизмы осей двухосных ОПУ большого телескопа, конструкция которого показана на рисунке 1.

В составе ОПУ можно выделить следующие структурные элементы:

- азимутальная ось (А) в составе вертикального вала (2) с моментом инерции J_2 , бесконтактного моментного электродвигателя (1) с моментом инерции статора относительно неподвижного основания J_{11} и моментом инерции ротора относительно статора J_{12} , твердотельной частью вала (3) в поясе верхней опоры с моментом инерции J_{13} , подшипниковых узлов верхней и нижней опор (4 и 4' соответственно) и кабельного перехода (5) с крутильной жесткостью относительно неподвижного основания c_{50} ;

- вилка (6) в сборе с опорами угломестной оси и горизонтальными цапфами с суммарным моментом инерции относительно неподвижного основания J_{30} ;

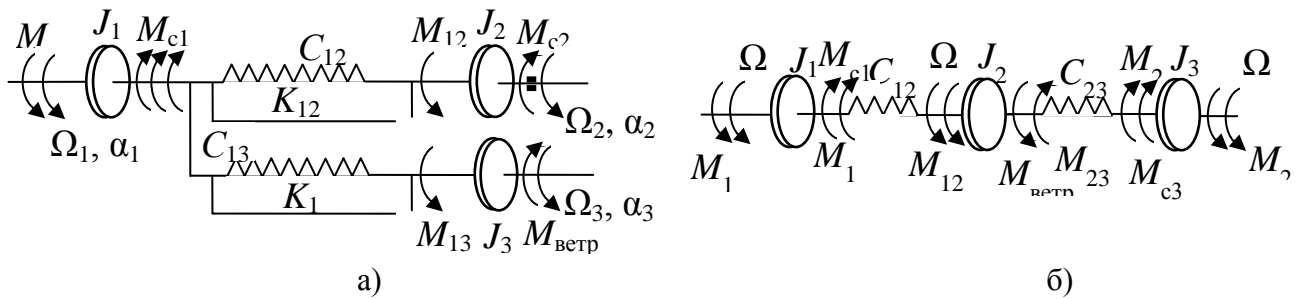
- труба телескопа с зеркалом (7), обладающая моментом инерции относительно неподвижного основания J_{40} .

- угломестная ось, включающая подшипниковые узлы опор оси (8), средник с трубой телескопа (7) с моментом инерции относительно оси вилки J_{16} , бесконтактный моментный двигатель (9) с моментом инерции статора относительно оси вилки J_{26} и ротора с моментом инерции относительно угломестной оси J_{36} , а также и кабельный переход (10).

Статоры двигателей связаны с основанием (двигатель азимутальной оси) и вилкой (двигатель угломестной оси) упругими и демпфирующими элементами, характеристики которых определяются размерами элементов и свойствами конструкционных материалов. Роторы двигателей закреплены на валах осей и представляют собой диски с постоянными магнитами.

В самом простейшем случае оси ОПУ представляются трехмассовыми моделями разветвленного (азимутальная ось) и неразветвленного (угломестная ось) типов, кинематические схемы которых представлены на рисунке 2.

Здесь J_1, J_2, J_2 – моменты инерции; C_{12}, C_{13}, C_{23} – крутильные жесткости; K_{12}, K_{13} – коэффициенты демпфирования; M_{c1}, M_{c2}, M_{c2} – моменты трения; M_{12}, M_{13}, M_{23} – моменты упругой связи.



Движение концов осей характеризуются угловыми скоростями Ω_1 , Ω_2 и Ω_3 и углами поворота α_1 , α_2 и α_3 .

Современная тенденция при построении энергетических подсистем (ЭПС) следящих электроприводов систем наведения квантово-оптических систем нового поколения состоит в отказе от согласующих редукторов, отказе от малонадежных исполнительных двигателей постоянного тока и переходе к безредукторным следящим электроприводам на основе бесколлекторных двигателей постоянного тока или вентильных двигателей, построенных на основе синхронных электродвигателей и управляемых от транзисторных инверторов с использованием сигналов датчика угла поворота ротора двигателя.

На рисунке 3 представлена обобщенная структурная схема ЭПС одномассового механизма, где β – жесткость линеаризованной механической характеристики вентильного двигателя, $T_э$ – электрическая постоянная времени фазной обмотки двигателя, $K_{пр}$ – статический коэффициент передачи усилительно-преобразовательного устройства, $T_{пр}$ – эквивалентная постоянная времени преобразователя.

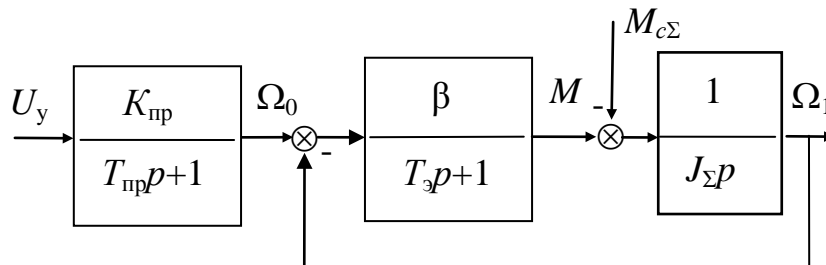


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема ЭПС

С учетом многомассовости механизмов ОПУ приведенным на рисунке 2 кинематическим схемам соответствуют структурные схемы ЭПС, представленные на рисунках 4 и 5.

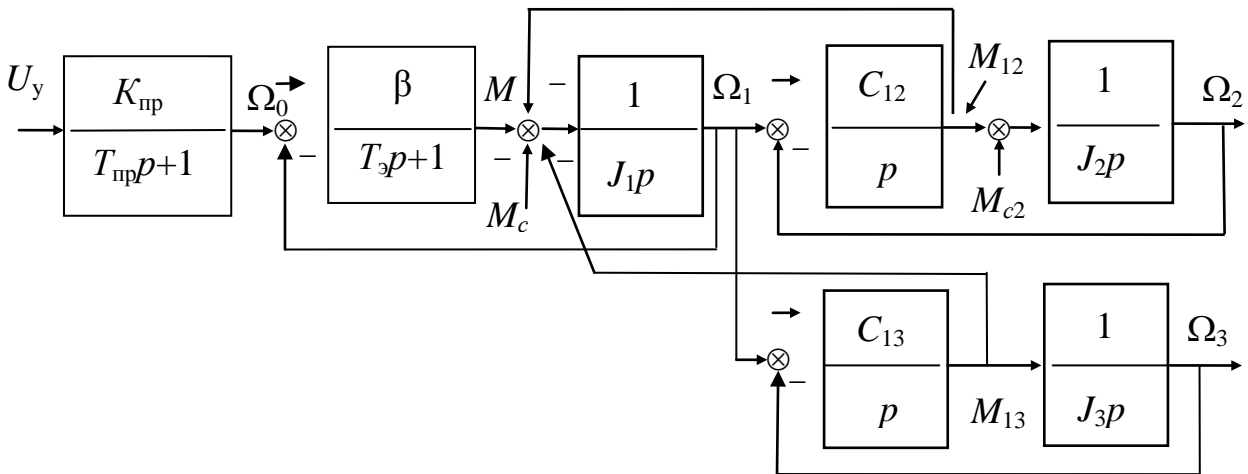


Рисунок 4 – ЭПС трехмассового механизма разветвленного типа

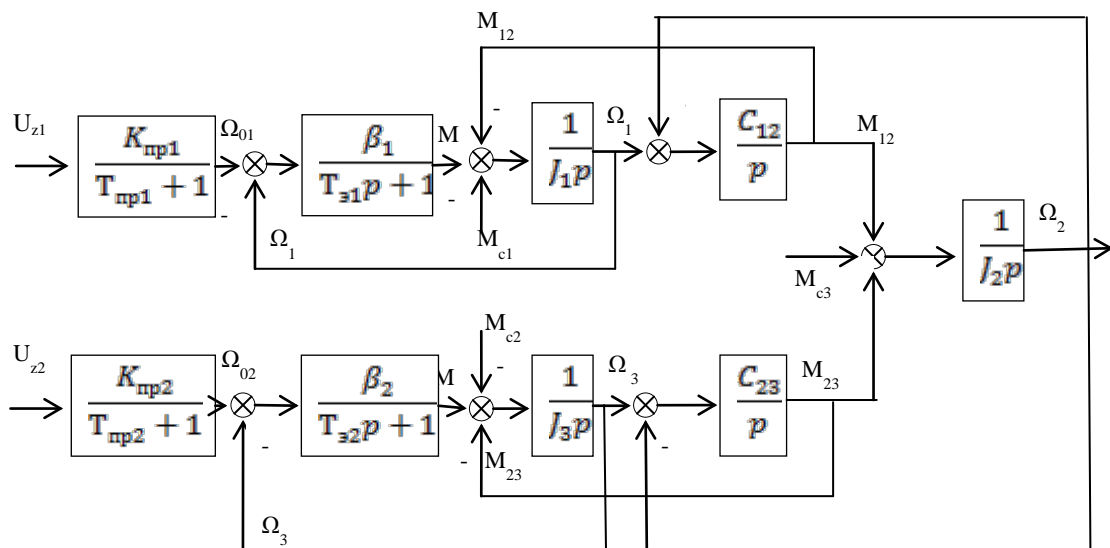


Рисунок 5 – ЭПС трехмассового механизма неразветвленного типа

Вторая глава посвящена моделированию и анализу механических переходных процессов в ЭПС следящих электроприводов с исполнительными осями, механизмы которых представляемы трехмассовыми моделями разветвленного и неразветвленного типов.

Структурным схемам, представленным на рисунках 4 и 5 соответствуют системы уравнений в матричной форме $dY/dt = AY + BU$,

$$\begin{bmatrix} d\Omega_1/dt \\ dM_{12}/dt \\ d\Omega_2/dt \\ dM_{13}/dt \\ d\Omega_3/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1/J_1 & 0 & -1/J_1 & 0 \\ C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 1/J_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & 0 & 0 & 0 & -C_{13} \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_{12} \\ \Omega_2 \\ M_{13} \\ \Omega_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/J_1 & -1/J_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/J_2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M \\ M_{c1} \\ M_{c2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} d\Omega_1/dt \\ dM_{12}/dt \\ d\Omega_2/dt \\ dM_{23}/dt \\ d\Omega_3/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{J_1} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & \frac{-1}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & C_{23} & 0 & -C_{23} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_3} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ M_{12} \\ \Omega_2 \\ M_{23} \\ \Omega_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} & \frac{-1}{J_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{J_3} & \frac{1}{J_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_{c1} \\ M_{c2} \\ M_{c3} \\ M_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Векторно-матричные математические модели (1) и (2) легли в основу программ для математического моделирования механических переходных процессов, а так же проведения спектрального анализа и определения резонансных частот исследуемых структур. Векторно-матричная математическая модель (2) пригодна для расчета процессов в системе как с одним, так и с двумя вращающимися моментами. При расчете процессов в системе с одним вращающимся моментом M_1 в исходных данных программы расчета достаточно положить $M_2=0$.

Результаты математического моделирования механических переходных процессов и численного спектрального анализа в структуре, описываемой системой уравнений (1), с параметрами $J_1=2120$ кг·м², $J_2=4480$ кг·м², $J_3=197300$ кг·м², $C_{12}=1.35 \cdot 10^9$ Н·м/рад, $C_{13}=8.62 \cdot 10^8$ Н·м/рад показали наличие двух резонансных частот - 51 и 178 Гц.

При математическом моделировании и численном спектральном анализе для системы уравнений (2) с одним двигателем ($M_1=2.62$ Н·м) с параметрами $J_1=50$ кг·м², $J_2=400$ кг·м², $J_3=50$ кг·м², $C_{12}=C_{13}=8 \cdot 10^6$ Н·м/рад наблюдается две резонансных частоты для первой и третьей массы - 64 и 72 Гц. Для второй массы резонансная частота равна $f_{p2}=72$ Гц.

При моменте $M=M_1+M_2$, $M_1=M_2=1.31$ Н·м в двухдвигательной системе появляется одна резонансная частота $f_{p2}=72$ Гц, что подтверждается результатами спектрального анализа. Колебания первой и третьей масс имеют одинаковую амплитуду и фазу, противоположную фазе колебаний второй массы. Такие процессы свойственны механическим переходным процессам в двухмассовом механизме. При существенной несимметрии моментов имеют место

несинусоидальные колебания второй массы и резонансные пики в спектре проявляются на двух частотах.

Предлагается избежать процедуры численного спектрального анализа, рассчитывая резонансные частоты по полученным в диссертационной работе аналитическим соотношениям. Используя матрицы \mathbf{A} систем уравнений (1) и (2), получаем характеристическое уравнение $\det(p\mathbf{1}-\mathbf{A})=0$

$$p \cdot (p^4 + b \cdot p^2 + c) = 0 \quad (3,а)$$

где

$$b = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{13}J_2(J_1 + J_3)}{J_1J_2J_3}, \quad c = \frac{C_{12}C_{13}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}; \quad (3,б)$$

$$b = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{23}J_1(J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}, \quad c = \frac{C_{12}C_{23}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}; \quad (3,в)$$

для моделей разветвленного и неразветвленного типа соответственного.

Решая биквадратное уравнение (3,а), получим соотношения, определяющие угловые частоты механического резонанса, как

$$\omega_{p1} = \sqrt{\left(1 - \sqrt{1 - 4\frac{c}{b^2}}\right)\frac{b}{2}}, \quad \omega_{p2} = \sqrt{\left(1 + \sqrt{1 - 4\frac{c}{b^2}}\right)\frac{b}{2}} \quad (4)$$

или

$$f_{p1} = \omega_{p1}/(2\pi), \quad f_{p2} = \omega_{p2}/(2\pi). \quad (5)$$

Определяя резонансные частоты по формуле (5) с учетом (3) и (4) для трехмассовых механизмов с параметрами указанными выше получаем $f_{p1}=51$ Гц, $f_{p2}=178$ Гц (для модели разветвленного типа) и $f_{p1}=64$ Гц, $f_{p2}=72$ Гц (для модели неразветвленного типа), что совпадает со значениями, полученными в результате спектрального анализа и подтверждает корректность предложенных соотношений.

В **третьей главе** разработаны структуры, математические модели и предложены аналитические соотношения для расчета параметров регуляторов систем управления однодвигательных и двухдвигательных электроприводов с трехмассовыми исполнительными осями.

В качестве расчетной предложена четырехконтурная система регулирования угла поворота, представленная на рисунке 6.

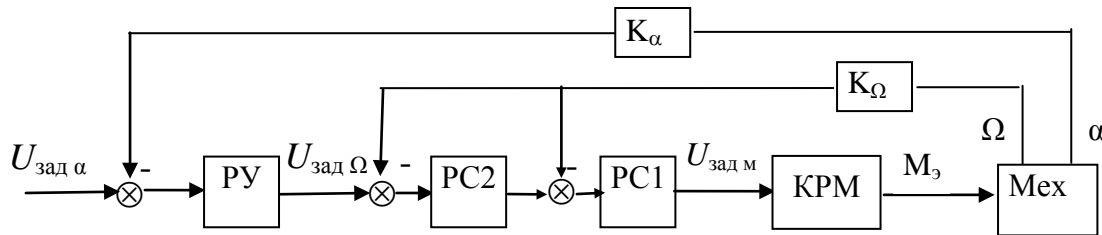


Рисунок 6 – Четырехконтурная система регулирования угла

В диссертационной работе рассматриваются 4 структуры: блок «Мех» может быть разветвлённым с обратной связью по Ω_1 или Ω_2 , и неразветвленным, для последнего предусмотрено наличие одного и двух двигателей в контуре регулирования электромагнитного момента (КРМ).

Система управления содержит основной контур регулирования угла с ПИ-регулятором (РУ) и подчиненную трехконтурную скоростную подсистему с внутренним КРМ и двумя внешними контурами регулирования скорости с И-регулятором РС1 и П-регулятором РС2, замкнутыми по сигналу датчика скорости с коэффициентом передачи K_Ω . Такое построение скоростной подсистемы при настройке каждого из контуров на «технический оптимум» позволяет снизить перерегулирование при реакции на скачок сигнала задания до 4,3% относительно перерегулирования в одноконтурной скоростной подсистеме (43%) с ПИ-регулятором скорости и настройке на «симметричный оптимум». На входе основного контура напряжение $U_{\text{зад } \alpha}$, пропорциональное заданному значению угла поворота, сравнивается с напряжением датчика угла с коэффициентом передачи K_α . Выходной сигнал РУ $U_{\text{зад } \Omega}$ поставляет напряжение задания для внешнего контура регулирования скорости первой массы Ω_1 . (или второй массы Ω_2 в зависимости от рассматриваемой структуры). Выходной сигнал РС1 $U_{\text{зад } м}$ является сигналом задания для КРМ.

КРМ содержит ПИ-регулятор момента с коэффициентом передачи $K_{п1}$ и постоянной времени интегрирования $T_{и1}$. На входе регулятора сигнал задания $U_{\text{зад } м}$ сравнивается с сигналом датчика момента, обладающего коэффициентом

передачи K_m . КРМ настраивается на технический оптимум. Оптимизация контура регулирования момента осуществляется из условия обеспечения аperiodического переходного процесса с заданной постоянной времени T_T на основе соотношений

$$T_{и} = T_{э} \text{ и } K_{п} = T_{и} / (\beta \cdot K_{пр} \cdot K_m \cdot T_T), \quad (6)$$

Минимально возможная величина эквивалентной постоянной времени T_T замкнутого контура регулирования момента определяется $T_{пр}$. В процессе моделирования во всех режимах было принято $T_T = 2T_{пр}$.

Настройка внутреннего контура регулирования скорости на технический оптимум осуществляется из условия реализации полосы пропускания частот $\omega_{ор}$, определяемой по формулам (4).

$$T_{T1} = 1/2\omega_0. \quad (7),$$

Настройка внешнего контура регулирования скорости на технический оптимум осуществляется из условия реализации полосы пропускания частот $2 \cdot \omega_0^*$, связанной с резонансной угловой частотой ω_{p0} соотношением

$$\omega_0^* < \omega_{p0} / \sqrt[4]{\gamma^3} \quad (8)$$

где ω_{p0} – наименьшая из угловых частот механического резонанса, определяемая по (4), а γ – коэффициент соотношения масс, зависящий от структуры КРМ и Мех.

Так для трехмассового механизма разветвленного типа

$$\gamma = (J_1 + J_2 + J_3) / (J_1 + J_2), \quad (9)$$

для трехмассового механизма неразветвленного типа с одним двигателем

$$\gamma = (J_1 + J_2 + J_3) / J_1, \quad (10)$$

для трехмассового механизма неразветвленного типа с двумя двигателями

$$\gamma = (J_1 + J_2 + J_3) / (J_1 + J_3), \quad (11)$$

Коэффициент передачи П-регулятора РС1 $K_{п2}$ определяется соотношением

$$K_{п2} = \frac{(J_1 + J_2 + J_3) K_m}{2T_{T1} K_{\Omega}}. \quad (12)$$

Постоянная времени интегрирования И-регулятора РС2 равна

$$T_{и2} = 4T_{T1}. \quad (13)$$

При такой настройке полоса пропускания частот внешнего контура регулирования скорости равна ω_{0p} , а расчетное время реакции контура на скачок задающего воздействия $-6/\omega_{0p}$.

Контур регулирования угла поворота настраивается на симметричный оптимум с помощью ПИ-регулятора угла РУ с параметрами $K_{п3}$ и $T_{и3}$.

Настройка на симметричный оптимум обеспечивается при выборе параметров регулятора угла на основе соотношений

$$T_{и3}=16 T_{т1}, K_{н3}=\frac{K_{\Omega}}{8T_{т1}K_{\alpha}}. \quad (14)$$

Расчетное время реакции углового контура на скачок задающего воздействия определяется величиной $24/\omega_{0p}$, а полоса пропускания частот $-\omega_{0p}/4$.

Математическая модель системы с трехмассовым механизмом разветвленного типа представляется векторно-матричным уравнением $dY/dt=AY+BU$, где $Y^T = [y_{p1} \ y_{p2} \ y_{p3} \ \Omega_0 \ M \ \Omega_1 \ M_{12} \ \Omega_2 \ M_{13} \ \Omega_3 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]$ – вектор состояния, элементами которого являются соответственно выходной сигнал интегратора регулятора момента, выходной сигнал интегратора регулятора скорости, выходной сигнал интегратора регулятора угла, скорость идеального холостого хода обобщенного двигателя, электромагнитный момент двигателя, скорость первой массы, момент упругой связи, скорость второй массы, момент упругой связи, скорость третьей массы, угловое положение первой массы, угловое положение второй массы, угловое положение третьей массы;

$U = [U_{зад\alpha} \ M_{c1} \ M_{c2}]$ – вектор управления, элементами которого являются соответственно сигнал задания угла и моменты статической нагрузки на первой и второй массах;

A – матрица состояния размером 14×14 , ненулевыми элементами которой являются $a_{12}=K_{п2}/T_{и2}$, $a_{15}=-K_m$, $a_{16}=-K_{п2}K_{\Omega}$, $a_{23}=K_{п3}/T_{и3}$, $a_{26}=-K_{\Omega}$, $a_{3,11}=-K_{\alpha}$, $a_{31}=K_{пр}K_{п1}/(T_{пр}T_{п1})$, $a_{32}=K_{пр}K_{п1}K_{п2}/(T_{пр}T_{п2})$, $a_{34}=-1/T_{пр}$, $a_{35}=-K_{пр}K_{п1}K_m/T_{пр}$, $a_{31}=-K_{пр}K_{п1}K_{п2}K_{\Omega}/T_{пр}$, $a_{54}=\beta/T_3$, $a_{55}=-1/T_3$, $a_{56}=-\beta/T_3$, $a_{65}=1/J_1$, $a_{67}=a_{69}=-1/J_1$, $a_{76}=C_{12}$, $a_{78}=-C_{12}$, $a_{87}=1/J_2$, $a_{96}=C_{13}$, $a_{9,10}=-C_{13}$, $a_{10,9}=1/J_3$, $a_{11,6}=a_{12,8}=a_{13,10}=1$;

B – матрица управления размером 3×14 , ненулевыми элементами которой являются $b_{31}=1$, $b_{62}=-1/J_1$, $b_{83}=1/J_2$.

Синтезируем предложенную структуру с указанными ранее параметрами трехмассового механизма разветвленного типа и $K_{пр}=0,0262$, $T_{пр}=0,2$ мс, $T_3=1,6$ мс, $\beta=2,9 \cdot 10^4$, $K_M=1,34 \cdot 10^{-4}$ В/Нм, $K_\omega=38,1$ В·с/рад, $K_\alpha=6,366$ В/рад. Согласно (6)-(14) параметры регуляторов – $T_{и1}=1,6$ мс, $K_{п1}=3,929$, $T_{и2}=82$ мс, $K_{п2}=174,346$, $T_{и3}=0,328$ с, $K_{п3}=36,375$. Результаты моделирования процессов в системе с рассчитанными параметрами регуляторов, показали совпадение с кривых переходных процессов с их эталонными кривыми.

Результаты моделирования реакции системы с обратной связью по скорости второй массы на скачок задающего воздействия показали наличие возбуждения на частоте близкой к резонансной. Процессы в той же системе при увеличении коэффициента жесткости C_{12} на три порядка относительно исходного ($C_{12}=1.35 \cdot 10^{12}$) полностью совпадают с процессами системы, настроенной на технический оптимум и соответствуют процессам в системе с обратной связью по скорости первой массы. Таким образом, сделан вывод, что при расчетной жесткости C_{12} установка датчиков скорости и угла поворота на второй массе недопустима.

Математическая модель системы с трехмассовым механизмом разветвленного типа представляется векторно-матричным уравнением $dY/dt=AY+BU$, где $Y^T = [y_{p11} \ y_{p12} \ y_{p2} \ y_{p3} \ \Omega_{01} \ M_1 \ \Omega_{02} \ M_2 \ \Omega_1 \ M_{12} \ \Omega_2 \ M_{23} \ \Omega_3 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3]$ – вектор состояния, элементами которого являются соответственно выходные сигналы интеграторов регуляторов моментов, выходной сигнал интегратора регулятора скорости, выходной сигнал интегратора регулятора угла, скорость идеального холостого хода первого двигателя, электромагнитный момент первого двигателя, скорость идеального холостого хода второго двигателя, электромагнитный момент второго двигателя скорость первой массы, момент упругой связи, скорость второй массы, момент упругой связи, скорость третьей массы, угловое положение первой массы, угловое положение второй массы, угловое положение третьей массы;

$U = [U_{\text{зад}\alpha} \ M_{c1} \ M_{c2} \ M_{c3}]$ – вектор управления, элементами которого являются соответственно сигнал задания угла и моменты статической нагрузки на первой, и третьей массах второй массах;

A – матрица состояния размером 16×16 , ненулевыми элементами которой являются $a_{13}=a_{23}=K_{п2}/T_{и2}$, $a_{16}=-K_{m1}$, $a_{19}=a_{29}=-K_{п2}K_{\Omega}$, $a_{28}=-K_{m2}$, $a_{34}=K_{п3}/T_{и3}$, $a_{39}=-K_{\Omega}$, $a_{3,14}=-K_{п3}K_{\alpha}$, $a_{4,14}=-K_{\alpha}$, $a_{51}=K_{пр1}K_{п11}/(T_{пр1}T_{и11})$, $a_{53}=K_{пр1}K_{п11}K_{п2}/(T_{пр1}T_{и2})$, $a_{55}=-1/T_{пр1}$, $a_{56}=-K_{пр}K_{п11}K_{m1}/T_{пр1}$, $a_{59}=-K_{пр1}K_{п11}K_{п2}K_{\Omega}/T_{пр1}$, $a_{65}=\beta_1/T_{\varepsilon1}$, $a_{66}=-1/T_{\varepsilon1}$, $a_{8,13}=-\beta_1/T_{\varepsilon1}$, $a_{72}=K_{пр2}K_{п12}/(T_{пр2}T_{и12})$, $a_{73}=K_{пр2}K_{п12}K_{п2}/(T_{пр2}T_{и2})$, $a_{77}=-1/T_{пр2}$, $a_{78}=-K_{пр2}K_{п12}K_{m2}/T_{пр2}$, $a_{79}=-K_{пр2}K_{п12}K_{п2}K_{\Omega}/T_{пр2}$, $a_{87}=\beta_2/T_{\varepsilon2}$, $a_{88}=-1/T_{\varepsilon2}$, $a_{89}=-\beta_2/T_{\varepsilon2}$, $a_{96}=1/J_1$, $a_{9,10}=-1/J_1$, $a_{10,9}=C_{12}$, $a_{10,11}=-C_{12}$, $a_{11,10}=1/J_2$, $a_{11,12}=-1/J_2$, $a_{12,11}=C_{13}$, $a_{12,13}=-C_{13}$, $a_{13,8}=a_{13,12}=1/J_3$, $a_{14,9}=a_{15,11}=a_{16,13}=1$;

B – матрица управления размером 4×16 , ненулевыми элементами которой являются $b_{41}=1$, $b_{9,2}=-1/J_1$, $b_{11,3}=-1/J_2$, $b_{13,4}=-1/J_3$.

Синтезируем предложенную структуру с указанными ранее параметрами трехмассового механизма разветвленного типа и $K_{M1}=K_{M2}=100$ В/Нм, $K_{\omega}=10$ В·с/рад, $K_{\alpha}=6,366$ В/рад. Согласно (6)-(14) параметры регуляторов – $T_{и2}=28$ мс, $K_{п2}=35,566$, $T_{и3}=0,112$ с, $K_{п3}=27,933$ для системы управления с одним двигателем и $T_{и2}=17$ мс, $K_{п2}=29,907$, $T_{и3}=67$ мс, $K_{п3}=46,978$ для системы управления с двумя двигателями.

Результаты моделирования показали, что в двухдвигательной скоростной подсистеме может быть реализована практически вдвое большая полоса пропускания частот, определяющая ее быстродействие, по сравнению в однодвигательной. Это достигается как более высокой резонансной частотой механизма, так и вдвое меньшим коэффициентом соотношения масс, определяющими параметры регуляторов. Второй фактор является наиболее существенным, так как позволяет повысить быстродействие вдвое даже при близких значениях резонансных частот трехмассового механизма.

В четвертой главе сформированы рекомендации по выбору элементной базы основных узлов следящих электроприводов с разрабатываемыми

структурами из условия обеспечения заданных требований к точности в типовых режимах слежения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

Предложены векторно-матричные математические модели механизмов разветвленного и неразветвленного типов, как элементов систем управления однодвигательных и двухдвигательных следящих электроприводов ОПУ, учитывающие многомассовость механизмов исполнительных осей.

С использованием предложенных моделей проведены исследования механических переходных процессов в энергетических подсистемах следящих электроприводов. Получены аналитические соотношения для определения резонансных частот механизмов исполнительных осей следящих электроприводов разветвленного и неразветвленного типов. Резонансные частоты, определенные с использованием предложенных аналитических соотношений, совпадают с частотами численного спектрального анализа кривых механических переходных процессов, что подтверждает корректность полученных аналитических соотношений.

При заданных значениях крутильных жесткостей в системах управления с трехмассовым механизмом разветвленного типа показана нецелесообразность установки датчиков скорости и угла на второй массе.

Показано, что в системах управления двухдвигательных следящих электроприводов при условии идентичности двигателей может быть реализована практически вдвое большая полоса пропускания частот, определяющая ее быстродействие.

Предложены аналитические соотношения для расчета параметров регуляторов систем управления однодвигательных и двухдвигательных следящих электроприводов с трехмассовыми исполнительными осями, корректность которых подтверждена результатами моделирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список публикаций в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Сергеева М.Е., Толмачев В.А., Никитина М.В. Синтез системы управления электропривода азимутальной оси алтайского телескопа ТИ-3.12 // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского университета информационных технологий, механики и оптики. - Санкт-Петербург, 2010. - Т. 5. - № 69. - С. 39-43. 0,281 п.л. /0,09 п.л.

2. Сергеева М.Е., Толмачев В.А., Никитина М.В. Анализ динамических свойств трехмассовых исполнительных осей с одним и двумя вращающимися моментами // Известия высших учебных заведений. Приборостроение 2015 Т.58 № с.458-463. 0,375 п.л. /0,125 п.л.

3. Кононова М.Е., Толмачев В.А., Никитина М.В. Синтез скоростной подсистемы двухдвигательного следящего электропривода телескопа с трехмассовым механизмом исполнительной оси // Известия высших учебных заведений. Приборостроение 2015 Т.58 №8 с.645-652. 0,469 п.л./0,156 п.л.

Труды конференций:

4. Сергеева М.Е. Оптимальное управление движением следящего электропривода с трехмассовой исполнительной осью и его моделирование в среде Matlab // Альманах научных работ молодых ученых. - Санкт-Петербург, 2012. - С. 249-254. 0,313 п.л./0,156 п.л.

5. Сергеева М.Е. Скоростная подсистема следящего электропривода с трехмассовой исполнительной осью и цифровыми алгоритмами управления // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых Вып.2. - Санкт-Петербург, 2012. - С. 282-283. 0,063 п.л.

6. Сергеева М.Е. Сравнение результатов моделирования процессов, в системе регулирования угла следящего электропривода с трехмассовой и двухмассовой исполнительной осью // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых Выпуск 2. - Санкт-Петербург, 2013. - С. 229. 0,063 п.л.

7. Сергеева М.Е. Устранение релаксационных колебаний в системах управления электроприводом с многомассовыми механизмами // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых Выпуск 2. - Санкт-Петербург, 2014. - С. 304-305. 0,063 п.л.

8. Сергеева М.Е. Синтез цифровых алгоритмов управления скоростной подсистемы следящего электропривода с трехмассовой исполнительной осью // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. - Т. 1 - С. 178-182. 0,281 п.л. /0,07 п.л.