

На правах рукописи
УДК 62-50

Аббаси Домиан

**РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСОВ
СЛЕЖЕНИЯ И НАВЕДЕНИЯ В СОСТАВЕ
МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ**

05.02.05. Роботы, мехатроника и робототехнические системы

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук



Москва – 2001

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Медведев В.С.

Официальные оппоненты:

Ющенко А. С., д.т.н., профессор

зав. каф. РК-10 МГТУ им. Н.Э. Баумана

Егоров О. Д., к.т.н., доцент каф. "Робототехника

электроника", МГТУ Станкин

Московский Гос. Институт Радиотехники, электроники

и информатики (Техн. университет) г. Москва

1575823

Аббаси Д.

3 Расчет механических

1 элементов комплексов

2001

0.00

ится "24" 12 2001 г. на

а Д212.141 02 Московского

рситета имени Н.Э. Баумана по адресу:

кая ул., дом 5.

лярах, заверенные гербсвой печатью.

ться в библиотеке МГТУ имени Н.Э.

1-м экземпляре), заверенный печатью

су: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская

аумана.

2001 г.

1575823

Иванов В.А.

59т. объем 1.0 и л Тир. 10

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1575823

Аббаси Д. Расчет Механичес

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Системы слежения и наведения предназначены для наблюдения за подвижными объектами в диапазоне действия используемых в данных системах датчиков. Такие системы позволяют получить конкретную информацию о выбранной цели: её местоположении, скорости и направлении движения.

В состав системы наведения и слежения входят три главных компонента:

1. поворотное-приводное устройство (ППУ) с исполнительным двигателем, обеспечивающее движение опоры или платформы, на которых крепятся датчики системы;
2. датчики, необходимые для наведения и слежения за объектами, например: тепловизор, телекамера, дальномер, радар, телескоп, антенна связи и т.д.;
3. система управления, обрабатывающая поступающие данные и снабженная монитором с рукояткой управления и узлом автоматического слежения.

Таким образом, рассматриваемый класс систем включает механические, электронные, сенсорные элементы, управляемые ЭВМ или микропроцессорами. В настоящее время такие системы называют мехатронными системами. Для эффективного функционирования такой системы важно так ее спроектировать, чтобы ее отдельные составляющие работали в тесной взаимосвязи и обеспечивали устойчивую работу системы в целом.

Точность механической систем ППУ, ее упругость, инерционность в значительной степени определяют динамические показатели и точность работы системы в целом. Поэтому проектирование механической передачи должно выполняться совместно и в тесной связи с разработкой всей системы.

Это обуславливает настоятельную необходимость внедрения в практику проектирования систем (в том числе и ППУ) современных средств и методов, позволяющих автоматизировать процесс проектирования. Применение автоматизированных методов позволяет значительно сократить сроки проектирования, повысить точность выполняемых расчетов, существенно повысить качество рассматриваемых вариантов проекта.

В работах П.С. Мелкозерова, Б.К. Чемоданова, Л.А. Сенько, Ю. Н. Семенова, Е.С. Блейза, В.П. Петухова, Н.А. Лакоты, В.С. Кулешова, Е.И. Кубарева и др. Авторы основное внимание уделяется вопросам проектирования следящих систем и практически не рассматривают вопросы конструкторских расчетов при проектировании механической системы следящих приводов. С другой стороны вопросам проектирования механических передач в технике посвящены работы многих специалистов в области деталей машин М.Н. Иванова, Д.Н. Решетова, О.Ф. Тищенко, В.А. Шувалова, Д.Н. Решетова, Х.В. Бараката,

С.А. Баида и многих других ученых, но в этих работах не учитывается специфика следящего привода.

Развитие нового класса технических систем – мехатронных систем поставило перед исследователями целый ряд новых задач, в том числе создания методов расчета механических системах их компонентов как части единой системы и автоматизация выполнения этих расчетов. Поэтому возникает задача создать методику расчета электромеханических устройств приводов с учетом влияния их характеристик на динамику всей системы и разработать методы автоматизированного расчета этих устройств и анализа работы всей системы в целом.

Цель и задачи работы. Целью диссертации является создание метода автоматизированных расчетов механических компонентов систем слежения и наведения с учетом их влияния на динамику всей системы в целом. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. выполнить анализ ряда существующих систем слежения;
2. провести сравнительный анализ технических данных серийно выпускаемых редукторов для следящих систем;
3. выделить основные критерии, определяющие качество редуктора следящей системы;
4. разработать методику проектирования редуктора для следящей системы;
5. реализовать программный комплекс для расчета редукторов для следящих приводов;
6. создать программное обеспечение для проверки работы редукторов в составе следящего привода.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Выбор совокупности критериев качества для оценки работоспособности механизмов привода.

2. Методика и алгоритмы автоматизированного расчета электромеханических устройств приводов ППУ, соответствующих заданным критериям качества.

3. Математическое обеспечение интерактивной системы автоматизированного проектирования механизмов следящих приводов по предлагаемым методам и алгоритмам.

4. Методика и математическое обеспечение автоматизированного моделирования спроектированных механизмов в составе следящего привода.

Методы исследования. К основным методам, используемым при выполнении диссертации относятся теория конструирования машин и механизмов, линейная и нелинейная теория автоматического управления, математическое моделирование.

Достоверность результатов. Результаты теоретических расчетов подтверждены математическим моделированием и практикой проектирования механических передач в научном центре Сирии.

Научная новизна основных результатов, содержащихся в диссертации:

1. сравнительный анализ серийно выпускаемых редукторов, построенных по классической схеме и редукторов новых типов с рекомендациями по их применению в качестве механических устройств следящих систем.

2. показатели качества механических устройств как элементов поворотного-приводных устройств следящих приводов, эти показатели применяются для выбора вариантов построения проектируемых механизмов.

3. обобщение существующих методов расчета редукторов и на его основе создание методики расчета поворотного-приводных устройств.

4. реализация предложенной методики и алгоритмов в виде интерактивной системы автоматизированного проектирования для выполнения расчетов по выбору кинематической схемы редуктора, расчету величины люфтов и кинематической погрешности. Математическое обеспечение для автоматизированной системы проектирования и взаимодействия проектировщика и ЭВМ.

Практическая ценность и внедрение. Практическая ценность результатов, полученных в диссертации заключается в том, что

- с помощью разработанных в диссертации алгоритмов и программ удастся значительно быстрее и в интерактивном режиме решать задачу расчета электромеханизмов систем слежения с учетом их влияния на динамику всей системы в целом и благодаря этому повысить качество их проектирования;
- на основе предлагаемой в диссертации методики можно быстро сравнить параметры редукторов рассчитанных по различным критериям качества;
- созданная в диссертации библиотека блоков *Simulink* может быть применена для моделирования следящих систем различного типа.

Результаты выполненных исследований используются в Научном центре Сирии при разработке систем слежения и учебном процессе Дамасского университета. Эти результаты могут быть использованы в других организациях, проектирующих следящие системы и в вузах готовящих инженеров по соответствующим специальностям.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертации доложены на семинарах в Научном центре Сирии, Дамасском университете и кафедры "Специальная робототехника и мехатроника" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано две печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 241 страницах печатного текста и включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Библиография содержит 52 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений.

В введении на примере системы слежения "Тритон" (ЮАР) дана краткая характеристика существующих ОПУ и предъявляемых к ним требований. При проектировании следящей системы необходимо спроектировать редуктор, чтобы его технические характеристики существенно не снижали бы качество работы системы.

На основе анализа существующих работ показано, что исследования по проектированию редукторов ведутся в двух направлениях: влияние характеристик редуктора на динамику следящей системы и развитию методов конструирования редукторов, однако совместному решению этих двух задач уделяется недостаточное внимание. Решение этой проблемы и поставил перед собой автор диссертации.

Сложность современных следящих систем, широкий диапазон их применения, многообразие возможных форм построения и вариантов реализации, постоянный рост требований по точности и быстродействию приводит к усложнению их технической реализации и увеличению сроков проектирования.

Это обуславливает настоятельную необходимость внедрения в практику проектирования систем (в том числе и ППУ) современных средств и методов, позволяющих автоматизировать процесс проектирования. Применение автоматизированных методов позволяет значительно сократить сроки проектирования, повысить точность выполняемых расчетов, существенно повысить качество рассматриваемых вариантов проекта. В этой связи представляется вполне справедливым утверждение о том, что сейчас вряд ли целесообразно развивать методы, связанные со сложными ручными вычислениями, применением графиков, номограмм и т. п. Развитию автоматизированных методов расчета электромеханических устройств как компонента всей мехатронной системы автор уделяет основное внимание.

Далее во введении анализируется состояние рассматриваемого вопроса и ставится задачи, решаемые в диссертации.

В первой главе диссертации рассматриваются конструкции некоторых систем слежения и наведения, их основные данные, приводятся характеристики электромеханических элементов этих систем и данные ряда серийно выпускаемых редукторов с их сравнительными характеристиками. Рассматривается ряд нетрадиционных типов редукторов и выполнено сравнение их характеристик.

Рассматриваются данные серийно выпускаемых редукторов, которые могут быть использованы в следящих системах. Исследуются как традиционные механические передачи, так и нетрадиционные, построенные на новых принципах. Для нетрадиционных механических передач автором выданы рекомендации о преимуществах и недостатках каждого типа редуктора и получены графические зависимости, позволяющие проектировщику выбрать для следящей системы редуктор того или иного типа.

В настоящее время в следящих системах широко используются быстроходные электродвигатели, которые отличаются малыми массами и габаритными размерами, для согласования таких двигателей с нагрузкой требуется применение редукторов. При этом, учитывая специфику объекта, к редукторам предъявляют особые требования по величине люфта, КПД, жёсткости, моменту инерции быстроходного вала, а также массогабаритным показателям. Практически всегда снижение величины открытого люфта редуктора находится в противоречии с его КПД.

При проектировании любого вида зубчатой передачи перед конструктором – расчётчиком возникает целый ряд вопросов, которые он должен решить в определённой последовательности. К числу основных вопросов, которые необходимо решить при проектировании, относятся следующие:

1. определение общего передаточного отношения;
2. выбор типа передачи и вида зацепления;
3. определение количества ступеней в передаче и распределения передаточного отношения по ступеням;
4. определение числа зубьев колёс, расчёт на прочность и определение модуля зацепления;
5. определение геометрических параметров колёс;
6. расчёт сил и моментов;
7. определение КПД передачи;
8. определение мощности на входе редуктора;
9. расчёт передачи на точность, выбор степени точности колёс, вида сопряжения;
10. определение величины люфта и кинематической погрешности передачи;
11. расчёт валов и подбор подшипников.

Выбор типа передачи, используемой в следящих системах, от передаваемой мощности, передаточного отношения, требовании ограничения инерционности, режима работы, требующейся точности передачи, бесшумности, необходимости реверсирования движения, расположения входного и выходного звеньев, условий эксплуатации, технологичности выполнения, экономичности изготовления и целого ряда факторов.

Автором диссертации выполнен сравнительный анализ, серийно производимых в настоящее время различными фирмами редукторов традиционной и нетрадиционной конструкций.

При проектировании следящего привода можно выбирать готовый редуктор, выпускаемый той или иной фирмой, из каталога или, если редуктор с подходящими характеристиками не производится, вновь его проектировать. При выборе редукторов из каталога удобно использовать зависимости, найденные автором диссертации.

В настоящее время возникла необходимость:

- определить основные критерии, определяющие качество механических передач следящих систем слежения и наведения;
- разработать алгоритмы их автоматизированного расчета механической части привода целью определения основных ее параметров, при которых обеспечивается рациональное значение выбранного показателя качества;
- автоматизировать моделирование спроектированного привода в целях определения влияния технических характеристик редуктора на динамику привода в целом как единой мехатронной системы так как необходимо оперативно в реальном масштабе времени выполнять расчет нескольких вариантов построения редуктора и выбирать из них наиболее рациональный.

Вторая глава диссертации посвящена разработке методики и алгоритмов для автоматизированного расчета зубчатого редуктора. Особенностью проектирования электромеханических устройств следящих приводов по сравнению с механизмами обычных приводов, используемых в машиностроении, является необходимость обеспечения не только прочности и износостойкости механизма, но и требуемых значений жесткости, точности и инерционности механизма. В этом случае проектирование следует проводить по всем указанным направлениям. Подобная работа требует определенного опыта от разработчика, а также использования большого количества подручного материала в виде таблиц, графиков, ГОСТов, каталогов и т.д. Методика выбора двигателя и расчета редуктора рассматривается в настоящей главе.

Автор выделяет основные критерии, которые позволяют оценить качество работы механической передачи в составе следящего привода. К таким критериям относятся габариты и масса редуктора, приведенный к выходному валу момент инерции подвижных частей редуктора, погрешность передаваемого угла и величина люфта или комбинация этих критериев.

Для реализации этих критериев выбраны наиболее приемлемые или предложены новые алгоритмы для выбора двигателя, числа ступеней редуктора, модуля зубчатых колес, обеспечения гарантированного зазора и расчета погрешностей редуктора ввиду наличия люфтов, упругости передачи и кинематической погрешности.

Блок схема предлагаемого в диссертации алгоритма расчета электромеханизма следящей системы приведена на рис. 1.

Расчет начинается с вычисления требуемой мощности двигателя по формуле

$$P_{\text{дм}} = \frac{2J_0\ddot{\alpha} + M_T + M_B}{\eta} \cdot \dot{\alpha}$$

где $P_{\text{дм}}$ - требуемая максимальная мощность, Вт; η - КПД редуктора; J_0 – момент инерции нагрузки, M_T , M_B – момент трения и возмущающий момент на валу нагрузки; $\dot{\alpha}$; $\ddot{\alpha}$ – угловая скорость и ускорение вала нагрузки. В зависимости от полученной величины мощности двигателя выбирается из каталога, с последующей проверкой правильности его предпочтения.

Алгоритм расчета редуктора включает:

- выбор и определение кинематической схемы;
- выбор модуля каждой пары зубчатых колес;
- выбор и определение точности;
- выбор и определение специального средства повышения точности.

На первом этапе нужно выбрать кинематическую схему т.е. определить оптимальное число ступеней $n_{\text{опт}}$ и передаточные отношения каждой ступени U_i . Определение кинематической схемы происходит по следующим критериям:

а) *Минимизация габарита передачи*, в диссертации получена зависимость оптимального числа ступеней от общего передаточного отношения по данному критерию $n_{\text{опт}} = 1.85 \lg u_p$,

$\lg u_1 = \lg u_p / n$; $n = \lg u_p / \lg u_1$; откуда получаем

$$\lg u = 1/1.85 \approx 0.54,$$

$$u_1 = 3,33 \approx 3.5$$

$$u_1 = u_2 = \dots = u_n$$

б) *Минимизация массы передачи*. Получение минимальной массы рассматривается для редуктора с минимальными габаритами, в диссертации для данного критерия получена зависимость $n_{\text{опт}} = 3 \lg u_p$,

в) *Минимизация приведенного выходному валу момента инерции передачи*. Определение числа ступеней передачи и распределение общего передаточного отношения по ступеням из условий получения минимального значения приведенного к выходному валу момента инерции колес редуктора применяется, когда требуется получить ми-

нимальное время разгона редуктора, например в приводах следящих устройств. Распределение передаточных отношений определяются по по формуле полученной автором:

$$U_i = 10^{0,033 \left[\frac{15 (y_{a-(i-1)} - 7,6 \lg U_p)}{x_{a-(i-1)}} - 7,6 \lg U_p + 23,8 \right]}$$

где значения x, y определяются по таблице, приводимой в диссертации.

г) *Минимизация момента инерции передачи вне зависимости от передаточного отношения* заключается в расчете редуктора следящего привода при условии рационального уменьшения приведенного момента инерции редуктора и обеспечения стабильности его значения независимо от величины общего передаточного отношения редуктора. В диссертации получены соотношения для различных значений общего передаточного отношения, например при $n_{\text{опт}} = 5$; $75 \leq U_p < 300$

$$\begin{aligned} U_{cp} &= \sqrt[3]{U_p} = \sqrt[3]{U_p}, \\ U_1 &= \sqrt[3]{2cp}; U_2 = \sqrt{U_{cp}}; U_3 = U_{cp}; \\ U_4 &= U_{cp}^2 / U_2; U_5 = U_{cp}^2 / U_1 \end{aligned}$$

д) *минимизация погрешности передаваемой на выходной вал*. Из расчёта передачи на точность следует, что погрешность передачи будет тем меньше, чем меньше число ступеней в передаче. Если принять, что максимально возможное передаточное число отдельной пары цилиндрических зубчатых колес $u=8$, то можно определить необходимое число ступеней n из выражения $U_p = u^n = 8^n$

откуда получаем $n_{\text{опт}} = \lg u_p / \lg 8 = 1.110 \lg u_p$. $U_2 = U_3 = \dots = U_n = 8$

$$U_1 = \frac{U_p}{U_2 \cdot U_3 \cdot \dots \cdot U_n}$$

Следовательно, для снижения суммарной погрешности передачи надо: уменьшать число ступеней; увеличивать передаточное отношение тихоходной ступени; повышать точность изготовления и монтажа тихоходной ступени.

е) *Минимизация оптимального соотношения между массой, габаритами, точностью и моментом инерции передачи*. Оптимальное число ступеней $n_{\text{опт}}$ выбирают из условия минимизации габаритов, и далее производят разбивку общего передаточного отношения, принимая передаточное отношение тихоходной ступени максимально возможным.

На следующем этапе определяется модуль каждой пары колес из условия не превышения допустимых контактной напряженности и напряженности на изгиб.

Третьим этапом расчетов является определение точности передачи. Это означает необходимость определения суммы погрешностей передаваемых на выходной вал. Возникновение погрешностей связано, во-первых, с наличием люфта между зубчатыми колесами, с упругостью валов и кинематической погрешностью. Если известны погрешности, передаваемых на выходной вал редуктора, и сумма погрешностей на каждом валу, то можно определить, насколько точность предлагаемого механизма соответствует требуемой общей точности. Расчет точности состоит из следующих этапов:

а) определение вида сопряжения каждой пары зубчатых колес в зависимости от диапазона рабочих температур.

б) выбор и определение степени точности каждой пары зубчатых колес с учетом обеспечения требуемого мертвого хода и кинематической погрешности.

в) выбор и определение величины люфта (ГОСТ 1643-81, 9187-81),

г) выбор и определение упругости валов;

д) выбор и определение кинематической погрешности выполняется по формуле ГОСТ 9178-81, 1643-81.

Приводятся различные варианты механизмов, предназначенных для выбора люфта и пример расчета зубчатой передачи на основе предлагаемой методики.

Третья глава диссертации посвящена описанию разработанной автором интерактивной системы автоматизированного проектирования механической передачи, реализующей предлагаемую методику и алгоритмы описанные в главе 2.

Для успешного проектирования ППУ необходимы точный энергетический расчёт механизмов и выбор соответствующих двигателей, которые обеспечивали бы нужные моменты, ускорения и скорости поворотных основ. Далее важно выбрать кинематическую схему передач приводов, которая соответствовала бы конкретным условиям (минимальным габаритом, минимальной массе, минимальной передаваемой погрешности, минимальному моменту инерции и т.д.). И, наконец, необходим расчёт точности, включающий в себя выбор вида сопряжения между колесами, а также выбор степени точности, каждой пары и расчёт суммы погрешностей, передаваемых к выходному валу.

Для решения всех вышеназванных задач требуется большое количество формул, таблиц и графиков. Чтобы сэкономить время, а также избежать возможных ошибок в столь сложных расчётах, автором разработана компьютерная программа (САПР) расчёта редукторов для следящих систем Gears Calculation. При создании этой программы была использована вся теоретическая база, описанная в главе 2, обработаны таблицы и графики и из них были выведены формулы для расчёта.

Программа Gears Calculation написана на языке Delphi и работает под управлением операционной системы Windows 95 и 98 и рассчитана на

модули зубчатых колёс величиной до $m = 3.5$, их диаметр до 1600 мм и на 6-ю, 7-ю, 8-ю, и 9-ю степени точности.

Рассмотрены организация и структура разработанного математического обеспечения, организация взаимодействия между проектировщиком и ЭВМ. Описывается методика взаимодействия проектировщика и ЭВМ. Окна данной системы приведены на рис. 2, из которых понятен принцип общения проектировщика с ЭВМ. Приведены примеры ввода исходных данных и получения результатов расчета. Примеры иллюстрируются изображениями экрана дисплея на различных этапах расчета.

Программа содержит корректируемые базы данных по двигателям и прочностным и температурным свойствам металлов, применяемых для изготовления деталей редуктора.

Рассмотрен пример автоматизированного расчета механизма.

В четвертой главе рассматривается методика исследования влияния технических параметров редуктора на динамические свойства всего привода в целом как мехатронной системы. Современный следящий привод представляет собой сложную динамическую систему с перекрестными связями и многими нелинейностями, описываемую системой уравнений высокого порядка. Поэтому его анализ и синтез аналитически можно выполнить только в первом приближении для достаточно упрощенной модели СП. Окончательное суждение о работоспособности проектируемого привода можно вынести только после моделирования с учетом всех его особенностей. Для автоматизации процесса создания математической модели моделирования динамики сложных СП наиболее простым, удобным и наглядным является метод структурного моделирования, позволяющий пользователю в режиме человек-машина самому формировать модель СП, состоящую из готовых блоков и линий связи между ними. Для моделирования динамических систем на ЭВМ к настоящему времени разработано немало разнообразных инструментальных средств.

При структурном моделировании с помощью этих комплексов процесс построения модели и ее исследования делится на ряд этапов. На первом этапе проводится анализ математической модели объекта исследования с целью ее разделения на отдельные, функционально самостоятельные подсистемы, выявляется характер взаимосвязей отдельных подсистем. На основе этого анализа строится структурная схема СП. Затем с помощью графического редактора на основе библиотеки типовых блоков (или путем создания новых типов блоков), а также создания укрупненных блоков (субмоделей, макроблоков) на экране дисплея строится структурная схема следящего привода. На втором этапе с помощью редактора параметров задаются численные характеристики модели. На третьем этапе выполняется моделирование и производится анализ полученных результатов.

За основной метод исследования автором принято моделирование системы на цифровой ЭВМ. Предлагается для решения этой задачи применить программный комплекс *MATLAB* с системой *Simulink*. Однако в этом программном комплексе отсутствуют стандартные блоки для моделирования следящих систем. Поэтому автором разработана и отлажена библиотека для моделей отдельных элементов следящей системы: двигателей, редукторов, корректирующих устройств, и других элементов следящей системы. Применение этой библиотеки позволяет быстро, с высокой степенью достоверности построить модель практически любой следящей системы и выполнить ее исследование. Структура библиотеки приведена на рис. 7.

В пятой главе работы выполняется моделирование привода с редуктором, рассчитанным в третьей главе. При моделировании используются макроблоки из библиотеки блоков элементов следящего привода, созданной автором в четвертой главе.

На рис. 2 - 6 приведены логарифмические частотные характеристики системы при отсутствии люфта и значениях коэффициента упругости редуктора $c = 8 \times 10^3$, $c = 8 \times 10^4$, $c = 8 \times 10^5$. На графиках указаны запасы устойчивости по амплитуде и по фазе. Сделан вывод о том, что для удовлетворительной работы системы частота собственных колебаний подвижных частей редуктора должна быть более, чем значений частоты среза в 2.25 раза, т.е. должно выполняться соотношение $c \geq 2.25^2 \omega_c^2 J_n \approx 5 \omega_c^2 J_n$.

Проверена справедливость замены трехступенчатой модели редуктора эквивалентной одноступенчатой. Частотные характеристики этих моделей приводов показаны на рис. 10. Видно, что они различаются лишь на частотах более, чем на декаду превышающих частоту среза. Сходство динамики обеих моделей редукторов подтверждает и вид переходных функций. Однако справедливость такой замены следует в каждом конкретном случае проверить путем моделирования.

Для учета влияния люфта на динамику привода использован метод гармонической линеаризации. Из графиков логарифмических частотных характеристик (рис. 12) следует, что значения амплитудной частотной характеристики при пересечении фазовой частотной характеристикой значения 180° равны 10 дБ при $c = 2 \times 10^4$ и 30 дБ на частоте 23.1 рад/с и при $c = 2 \times 10^5$ на частоте 23,3 рад/с. Величина амплитуды автоколебаний будет в первом случае $A \approx 1.005a$ с частотой 23.11 рад/с, а во втором случае $A \approx 1.03a$ с частотой 21.3 рад/с (a – величина люфта). Автоколебания устойчивы, т.е. при наличии люфта в приводе имеют место устойчивые автоколебания с амплитудой равной 1 – 1,5 величины люфта. Графики процессов в системе приведены на рис. 13.

Полученные результаты позволили сделать вывод о правильности математического обеспечения и эффективности предлагаемой методики и алгоритмов.

В заключении сделан обзор полученных автором результатов и делаются рекомендации и выводы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена созданию методики и алгоритмов автоматизированного расчета механических устройств мехатронных систем с учетом их влияния на динамические свойства системы в целом на основе интерактивного взаимодействия проектировщика и ЭВМ.

Новыми основными научно-техническими результатами, полученными в диссертации, являются.

5. Сравнительный анализ серийно выпускаемых редукторов, построенных по классической схеме и редукторов новых типов с рекомендациями по их применению в механических устройствах следящих систем.
6. Сравнительная оценка показателей качества механических устройств поворотного-приводных устройств следящих приводов, применяемых для выбора вариантов построения проектируемых механизмов.
7. Обобщение существующих методов расчета редукторов и на его основе создание методики расчета электромеханизмов поворотного-приводных устройств.
8. Реализация предложенной методики в виде интерактивной системы автоматизированного проектирования для выполнения расчетов по выбору кинематической схемы редуктора, расчету величины люфтов и кинематической погрешности. Математическое обеспечение для автоматизированной системы проектирования и взаимодействия проектировщика и ЭВМ.
9. Расширена библиотека блоков элементов системы Simulink программного комплекса MATLAB за счет макромоделей элементов следящего привода и в том числе моделей редукторов. На основе этих блоков создана методика учета влияния основных параметров механических устройств на качество работы всей мехатронной системы.

Проведенные с помощью реализованной методики, алгоритмов и математического обеспечения исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Интерактивная система проектирования электромеханических устройств следящих систем ППУ позволяет за короткое время рассчитать различные варианты выбора параметров редуктора с учетом предъявляемых к нему требований и известных критериев. Затраты времени на расчет одного варианта занимают от 15 до 25 минут.
2. Расширения системы Simulink программного комплекса Matlab позволяют провести оценку влияния механической системы на динамику всей мехатронной системы в целом ,

определить показатели качества её проектирования и на основании этого уточнить при необходимости требования технического задания.

3. Собственная частота колебаний редуктора для обеспечения малого его влияния на динамику системы должна превосходить частоты среза системы не менее чем в $2 \div 2.5$ раза.
4. В работоспособной системе, рассчитанной без учета влияния редуктора в котором присутствует люфт, возникают устойчивые автоколебания с амплитудой равной примерно $1.1 \div 1.2$ величины люфта. Для устранения этого явления требуется устройств, выбирающих люфт.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. Аббаси Д., Петров Л.Н. Методика проектирования электроприводов следящих приводов. М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 32с., ил.
2. Abbasi D. Mechanical System of Interferometr for Testing Aspherical Lenses // Changchun China, vol. 12, 1995, CSIO, pp. 256-262. (Механическая система интерферометра для испытания асферических линз).

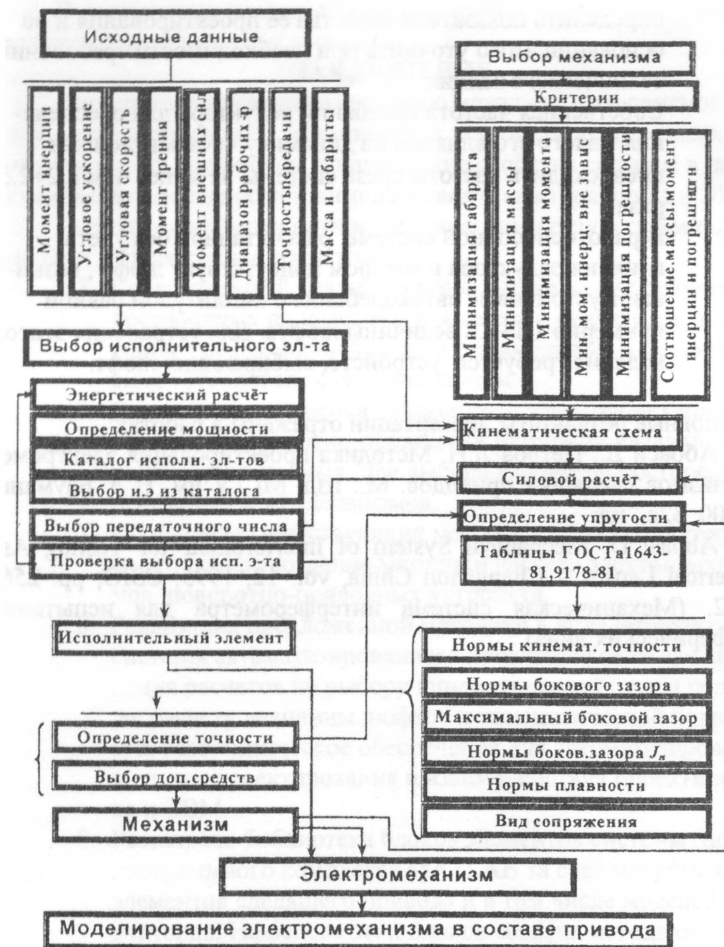


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета электромеханизма и анализа его динамики

The screenshot shows the 'Выбор двигателя' (Engine Selection) window. It contains several input fields and buttons. The 'Engine' section has fields for 'Angular Acceleration (1/s²)' (100), 'Angular Velocity (1/s)' (700), and 'Efficiency' (0.75). The 'Torque' section has fields for 'Moment of Inertia (kg·m²)' (1.50), 'Moment of Inertia (kg·m²)' (1.50), and 'Moment of Inertia (kg·m²)' (1.50). The 'Engine' section has fields for 'Engine Power (kW)' (100.00), 'Power Factor (kW)' (100.00), 'Transmission Ratio' (10.00), 'Efficiency' (0.75), 'Power' (100.00), and 'Torque' (1.50). There are 'Calculate' and 'Engine' buttons.

Рис. 2. Выбор двигателя.

The screenshot shows the 'Выбор числа ступеней' (Gear Selection) window. It contains several input fields and buttons. The 'Gear' section has fields for 'Gear Ratio' (100.00), 'Gear Ratio' (100.00), and 'Gear Ratio' (100.00). The 'Gear' section has fields for 'Gear Ratio' (100.00), 'Gear Ratio' (100.00), and 'Gear Ratio' (100.00). The 'Gear' section has fields for 'Gear Ratio' (100.00), 'Gear Ratio' (100.00), and 'Gear Ratio' (100.00). There are 'Calculate' and 'Gear' buttons.

Рис.3 Выбор числа ступеней

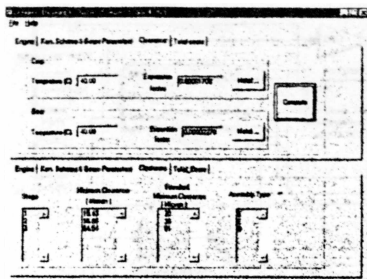


Рис. 4. Расчет параметров колес

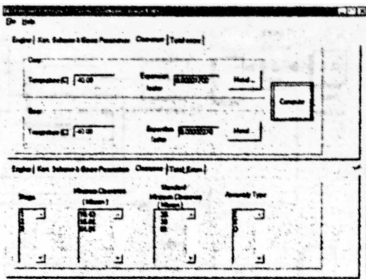


Рис. 5. Расчет зазоров

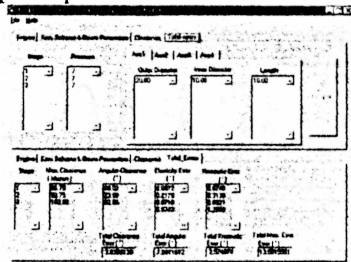
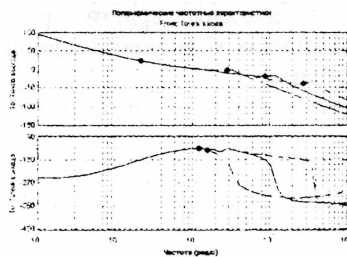


Рис. 6. Расчет точности передачи.



ис. 7. Структура библиотеки макроблоков для моделирования следящих приводов



ис. 8. Частотные характеристики при различной жесткости

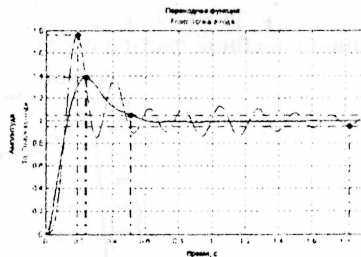


Рис. 9. Переходные функции при различной жесткости

