

На правах рукописи

УДК 62-522

Малышев Вячеслав Николаевич

ОПТИМИЗАЦИЯ ПО МНОГИМ КРИТЕРИЯМ
ПРИ ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИИ
АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРИВОДА

Специальность 05.04.13 – Гидравлические машины, гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2009

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

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Попов Д.Н.
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Ермаков С.А. кандидат технических наук, доцент Каганов Ю.Т.
Ведущее предприятие	Учреждение Российской академии наук Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

Защита диссертации состоится “20” мая 2009 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по указанному адресу.

Автореферат разослан “ 8 ” апреля 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук

Колосов М.А.

Актуальность темы. Проектирование машин, устройств и механизмов с близкими к оптимальным параметрами и характеристиками является одной из основных задач машиностроения. В условиях повышенных, а зачастую противоречивых, требований становится актуальной задача проектирования устройства с наилучшими показателями. Использование новых технологий проектирования с применением ЭВМ и методов САПР открывает перед конструктором возможности разработки практически оптимальных машин и аппаратов.

Одной из главных трудностей решения указанной задачи является выбор облика устройства в виде его конструктивной схемы. Не всегда требования к параметрам устройства можно формализовать или представить в численной форме. Между тем, практически оптимальный проектный вариант обоснованно может быть выбран, главным образом, в результате сравнения численных показателей устройств.

Специфика проектирования управляемых гидроприводов такова, что кроме конструктивных параметров существенное значение имеют динамические характеристики создаваемого устройства. Подход, направленный на оптимизацию только отдельных показателей, представляется неоправданным; более целесообразна оптимизация как по конструктивным параметрам, так и динамическим характеристикам гидропривода.

Цель проведенных исследований - построение алгоритмов многокритериальной оптимизации при выборе конструкции автономного электрогидравлического привода (АЭГП).

Методы исследования. Задача в данной работе решена на основе теоретических и экспериментальных исследований. Теоретические исследования базируются на известных положениях в области расчетов и проектирования гидроприводов, которые рассматривали в своих работах отечественные и зарубежные авторы: И.И. Бажин, Г.К. Боровин, С.А. Ермаков, М.Н. Жарков, Г.М. Иванов, Г.В. Крейнин, Д.Н. Попов, В.И. Разинцев, С.А. Ситников, В.М. Фомичев, В.Л. Хван, В.А. Целищев, J.F. Blackburn, G. Reethof, J.L. Shearer и др. Для изучения динамических процессов применялись методы математического моделирования, обоснованность которых подтверждалась использованием апробированных моделей и дополнительным экспериментом.

Для расчета характеристик приводов были составлены объектно-ориентированные математические модели, которые применялись при определении конструктивных размеров и динамических характеристик приводов.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторном образце автономного гидропривода при консультации Н.Г. Сосновского.

Научная новизна. Состоит в решении задачи многокритериальной оптимизации при выборе конструкции АЭГП. При решении получены: а) объектно-ориентированные математические модели, сформулированы

критерии оптимального управления приводом; б) алгоритмы расчета математически определяемых критериев, учитывающих также неформализуемые факторы; в) систематизированные по способам управления конструктивные схемы АЭГП, позволяющие эффективно применять методику в тех случаях, когда необходимо сначала осуществить выбор конструктивной схемы привода; г) разработаны алгоритмы определения паретовских границ оптимальности каждого варианта по трем критериям: динамическому, энергетическому и информационно-энергетическому. Задача оптимизации решена комплексно путем поиска наилучшего варианта как по энергетическим показателям, так и по показателям, характеризующим управление приводом.

Практическая ценность результатов. На основе разработанной в диссертации методики оптимального проектирования конструктор получает возможность обоснованно, из числа рассматриваемых проектных вариантов, выбрать лучший по совокупности критериев. Использование неформализуемых факторов позволяет учитывать опыт, знания и интуицию специалиста, а также рассматривать альтернативные варианты. Разработанная методика может быть применена при создании новых образцов гидроприводов и при совершенствовании существующих гидроприводов. Кроме того, представленная в методике интерактивная технология проектирования позволяет конструктору судить о том, как тот или иной параметр влияет на конечные характеристики проектируемого устройства.

Достоверность полученных результатов. Для обоснования достоверности объектно-ориентированных математических моделей проведен ряд экспериментов и использованы результаты исследований других авторов. Методика оптимального проектирования проверена путем сравнения оптимизированных конструкций АЭГП с опубликованными данными относительно их размеров и параметров.

Апробация работы. Основные положения диссертации отражены в печатных работах, докладывались и обсуждались на Московских научно-технических конференциях студентов и аспирантов. По содержанию работы на кафедре гидромеханики, гидромашин и гидропневмоавтоматики МГТУ им. Н.Э.Баумана сделано два доклада.

Научные работы. По материалам диссертации имеются 7 научных работ, из них в журналах по списку ВАК - 2. Научные работы посвящены объектно-ориентированным математическим моделям, вопросам идентификации параметров и многокритериальной оптимизации АЭГП.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 72 наименований, 2 приложений, содержит 180 страниц текста, 6 таблиц и 66 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи работы.

Первая глава содержит краткое описание применяемых в технических системах приводов. Рассмотрены особенности и тенденции проектирования автономных однокаскадных гидроприводов. На основании анализа и обзора литературных источников, посвященных расчету и проектированию гидроприводов с дроссельным регулированием, определены критерии качества гидроприводов, ограничения на значения параметров и функциональные ограничения.

Приведен обзор современных подходов к автоматизированному проектированию в машиностроении и обзор методов, изложенных в работах И.П. Норенкова, И.М.Соболя, Р.Б. Статникова и др. Выбранный метод ЛП_т-эффективен при решении трудноформализуемых задач и обладает равномерным распределением в пространстве варьируемых параметров, что позволяет находить решение с минимальными затратами времени. Представлены основные положения метода ЛП_т-поиска в задачах оптимизации машин и механизмов.

В конце главы перечислены этапы решаемой задачи, состоящей в разработке методики выбора оптимальной по многим критериям конструкции автономного привода с однокаскадным гидравлическим усилением мощности сигнала управления. В качестве исходных приняты схемы гидропривода с золотниковыми плунжерами, плоским золотником и струйной трубкой.

Схема первого типа автономного электрогидравлического привода (АЭГП) дана на рис.1. Электродвигатель 1 вращает вал трехшестеренного насоса 2, который создает потоки рабочей жидкости, направляемой к золотниковым плунжерам 3. В отсутствие подводимого от электронного усилителя сигнала U_{yc} жидкость через окна, открытые золотниковыми плунжерами, поступает на слив. Вследствие равенства площадей окон разность давлений в полостях гидроцилиндра 4 равна нулю и поршень 5 вместе со штоком 6 неподвижны. При наличии сигнала в виде напряжения на концах обмотки 7 ЭМП происходит поворот рычага 8 по или против хода часовой стрелки в зависимости от полярности сигнала. Поворот рычага вызывает перемещение золотниковых плунжеров, увеличивающих открытие одного окна и уменьшающих открытие другого. Соответственно давление в одной полости гидроцилиндра уменьшается, а в другой – увеличивается.

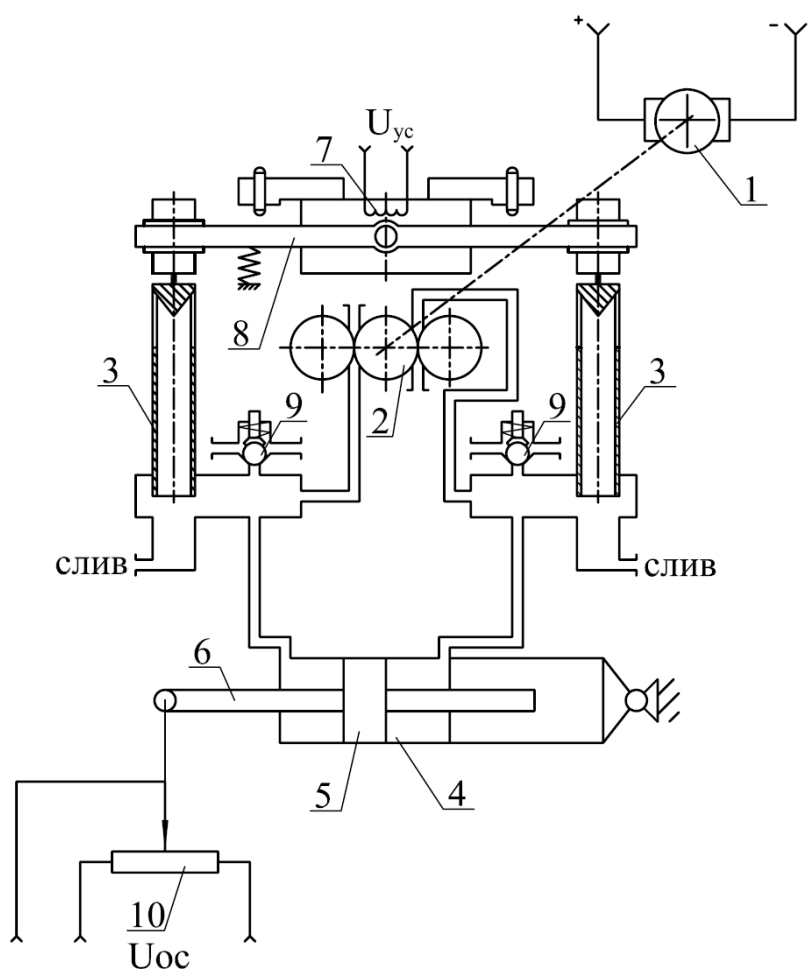


рис. 1. Схема АЭГП с двумя золотниковыми плунжерами

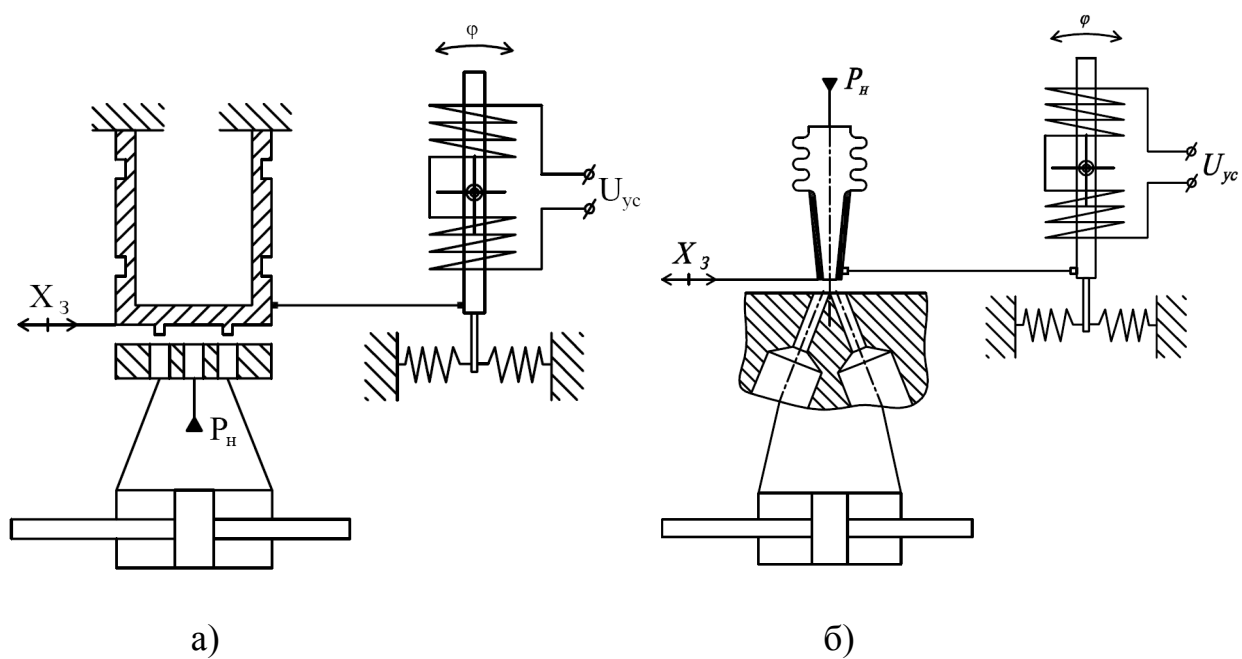


Рис. 2. Схемы гидроусилителей: а) с плоским золотником; б) со струйной трубкой

Под действием силы, созданной разностью давлений в гидроцилиндре, поршень 5 перемещается до тех пор, пока сигнал U_{oc} обратной связи от датчика 10 не компенсирует входной сигнал. Установленные на напорных магистралях насоса предохранительные клапаны 9 ограничивают чрезмерное повышение давления в гидроцилиндре. В качестве альтернативных схем описанного выше АЭГП могут быть схемы с плоским золотником и схема со струйной трубкой, рис. 2. В этих случаях используется двухшестеренный насос.

Во второй главе представлены объектно-ориентированные математические модели трех описанных выше типов АЭГП. Математические модели содержат алгебраические и дифференциальные уравнения, начальные условия. Выбран и обоснован метод численного решения полученной системы уравнений, разработана программа расчета на алгоритмическом языке Паскаль (Delphi).

Математическое описание АЭГП подробно рассмотрено на примере схемы с золотниковыми плунжерами. Две другие схемы в отношении такого описания имеют незначительные отличия. В основу математического описания АЭГП положены линейные модели, которые позволяют известными методами находить структуры и параметры, обеспечивающие оптимальное управление приводом. Методика может быть использована и в случае более сложных нелинейных математических моделей.

Линейная математическая модель АЭГП представлена следующими записанными в форме Коши уравнениями

$$\frac{dY_1}{dt} = \frac{K_{iu}(U_{вх} - K_{пос}Y_6)K_{yc} - Y_1}{T_y};$$

$$\frac{dY_2}{dt} = \frac{K_{X\phi}K_{\phi l}Y_1 - 2\xi_{yy}T_{yy}Y_2 - Y_3}{T_{yy}^2};$$

$$\frac{dY_3}{dt} = Y_2;$$

$$\frac{dY_4}{dt} = \frac{Y_3}{T_{гп}};$$

$$\frac{dY_5}{dt} = \frac{Y_4 - 2\xi_{ц}T_{ц}Y_5 - Y_6}{T_{ц}^2};$$

$$\frac{dY_6}{dt} = Y_5.$$

Начальные условия ($t_0=0$)

$$Y_1=0; \quad Y_2=0; \quad Y_3=0; \quad Y_4=0; \quad Y_5=0; \quad Y_6=0.$$

В систему уравнений входят следующие переменные состояния АЭГП:

$Y_1 = I_y$ – ток управления ЭМП, $Y_2 = V_3$ – скорость перемещения золотника, $Y_3 = X_3$ – перемещение золотника, $Y_5 = v_m$ – скорость перемещения штока

гидроцилиндра, $Y_6 = y_{шт}$ – координата штока гидроцилиндра, $U_{вх}$ – электрический входной сигнал, K_{noc} – коэффициент позиционной обратной связи, K_{yc} – коэффициент усиления электронного усилителя, $K_{X\phi}$ и $K_{\phi I}$ – коэффициенты передачи ЭМП, T_{yy} – постоянная времени ЭМП, ξ_{yy} – коэффициент относительного демпфирования ЭМП, $R_{обм}$ – сопротивление обмоток ЭМП, $R_{вых}$ – сопротивление выходного каскада электронного усилителя, $L_{обм}$ – индуктивность ЭМП.

Коэффициенты, входящие в систему уравнений, вычисляются с помощью формул:

$$T_y = \frac{L_y}{R_{обм} + R_{вых}}, \text{ с}, \quad K_{iu} = \frac{1}{R_{обм} + R_{вых}}, \text{ 1/Ом},$$

$$T_{гп} = \frac{S_{п}}{K_{QX}}, \text{ с}, \quad T_{ц} = \sqrt{\frac{m_o}{c'_{ц}}}, \text{ с},$$

где $c'_{ц}$ – приведенная жесткость нагруженного гидроцилиндра

$$c'_{ц} = \frac{2S_{п}^2 E_{ц}}{V_0 \left(1 + \frac{2S_{п}^2 E_{ц}}{V_0 c_{св}} \right)}, \text{ Н/м},$$

где $E_{ц}$ – приведенный модуль упругости гидроцилиндра, Н/м².

$$E_{ц} = \frac{B_{ж}}{1 + \frac{V_{л}}{V_0} + \frac{2S_{п}^2 B_{ж}}{V_0 c_{оп}}}, \quad V_0 = \frac{S_{п} Y_{шт.мах}}{2} \quad \text{– объем полости}$$

гидроцилиндра при среднем положении поршня, $Y_{шт.мах}$ – ход поршня, $V_{л}$ – объем жидкости в гидролиниях, соединяющих гидроцилиндр с золотниковыми плунжерами, $B_{ж}$ – модуль объемной упругости рабочей жидкости, Н/м², коэффициенты K_{QX} и K_{Qp} находятся с помощью линеаризации расходно-перепадной характеристики, $S_{п}$ – площадь поршня.

Коэффициент относительного демпфирования гидроцилиндра: $\xi_{ц} = \frac{T_{дц}}{2T_{ц}},$

$$T_{дц} = \frac{K_{Qp} m_o}{S_{п}^2} + \frac{k_{тр} V_0}{2E_{ц} S_{п}^2} + \frac{k_{тр}}{c_{св}}, \text{ с},$$

m_o – масса подвижных частей управляемого объекта, приведенная к штоку привода, $k_{тр}, \frac{H \cdot c}{м}$ – коэффициент гидравлического трения, $c_{кр}$ –

жесткость крепления гидроцилиндра, Н/м, $c_{оп}$ – жесткость опоры гидроцилиндра, Н/м, $c_{св}$ – жесткость связи штока с управляемыми органами объекта, Н/м, c_n – «жесткость» позиционной нагрузки, Н/м.

$$\frac{1}{c_{кр}} = \frac{1}{c_{оп}} + \frac{1}{c_{св}};$$

В третьей главе дано описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов для идентификации параметров основного варианта автономного гидропривода.

Идентификация параметров АЭГП была проведена на экспериментальной установке, имеющейся в лаборатории динамики и регулирования кафедры гидромеханики, гидромашин и гидропневмоавтоматики МГТУ им. Н.Э. Баумана. Схема установки представлена на рис. 3.

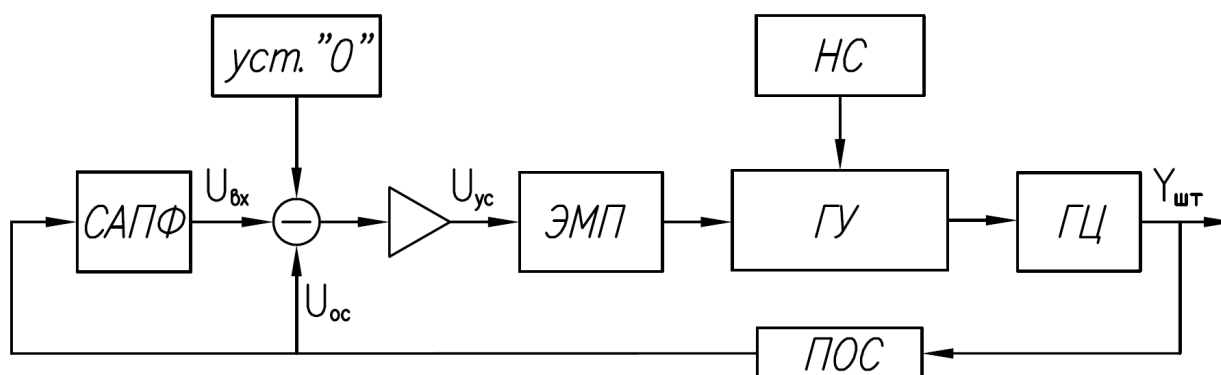


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

На схеме показаны: электромеханический преобразователь (ЭМП), однокаскадный гидроусилитель (ГУ), исполнительный гидроцилиндр (ГЦ) и датчик позиционной обратной связи (ПОС). Питание гидроусилителя жидкостью под давлением обеспечивается трехшестеренным насосом (НС), смонтированным в одном корпусе с другими элементами привода. Входные сигналы поступают от электронного низкочастотного генератора периодических колебаний, входящего в состав прибора САПФ (система анализа передаточных функций). Измеряемое перемещение штока гидроцилиндра (выходного звена) в виде U_{oc} поступает в блок регистрации САПФ от датчика, установленного на приводе. С помощью регулятора установки нуля (уст. «0») можно изменять начальное положение выходного звена ГЦ.

При работе установки электрический сигнал с выхода САПФ в виде гармонически изменяющегося напряжения $U_{вх}$ через электронный усилитель поступает на вход ЭМП, управляющего положением золотниковых плунжеров. Вследствие периодического смещения плунжеров от нейтрального положения

происходит периодическое изменение разности давлений в полостях ГЦ и поршень ГЦ вместе с его выходным звеном совершают колебания, близкие к гармоническим. Частота и амплитуда колебаний выходного звена привода при гармоническом входном сигнале поддерживается благодаря ПОС.

Входной сигнал $U_{вх}$ создавал низкочастотный генератор САПФ. Регистрируемый сигнал поступал в блок регистрации САПФ. Данный блок выделяет первую гармонику сигнала и вычисляет координаты логарифмических частотных характеристик исследуемой системы. Описанный режим работы установки использовался при определении экспериментальных частотных характеристик АЭГП. Значения численного эксперимента определены по структурной схеме на рис.4.

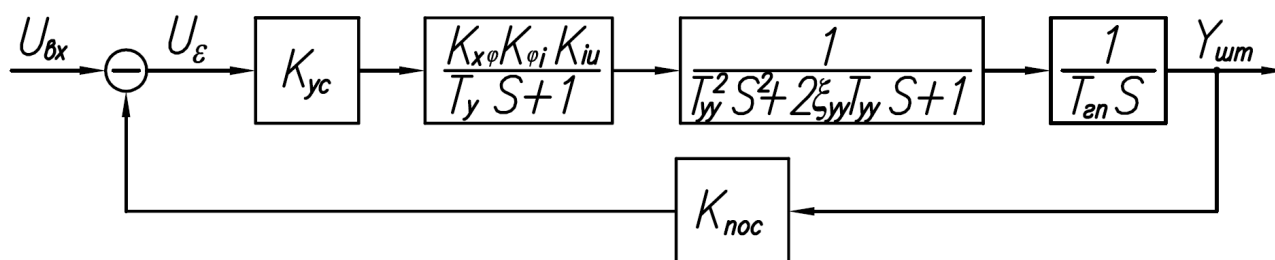


Рис. 4. Структурная схема ЭГСП экспериментальной установки

Точность измерений с помощью САПФ проверялась путем сравнения показаний прибора с частотными характеристиками, полученными при моделировании аperiodического звена первого порядка, реализованного на аналоговой вычислительной машине (АВМ), что позволило при необходимости учесть влияние электрических линий, передающих сигналы от датчиков АЭГП к проверяемому прибору. Постоянная времени и коэффициент усиления аperiodического звена имели соответственно следующие значения: $T = 0,1$ [с], $K = 1$. Тарировка показала, что САПФ обеспечивает достоверные значения параметров частотных характеристик.

Результаты экспериментов оформлены в виде логарифмических амплитудных (ЛАХ) и фазовых (ЛФХ) частотных характеристик, рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных частотных характеристик показывают, что при амплитудах входного сигнала, находящихся в диапазоне 0,1 ... 1,0 В, рассмотренная линейная математическая модель АЭГП в достаточной мере отражает динамику реального АЭГП.

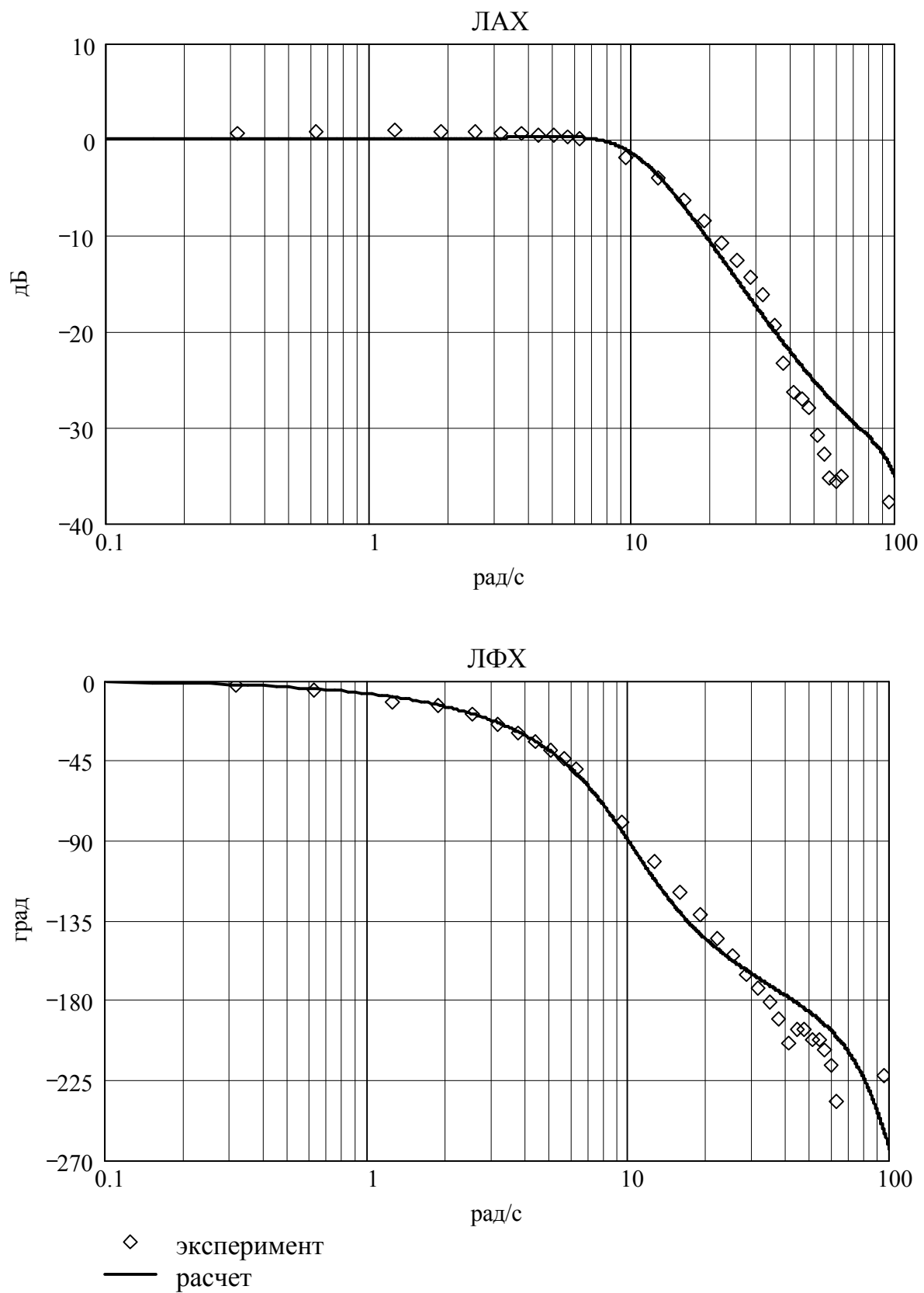


Рис.5. ЛАХ и ЛФХ при амплитуде входного сигнала $U_{вх} = 0,5 \text{ В}$

Четвертая глава посвящена решению задачи оптимального проектирования гидроприводов с дроссельным регулированием. Задача решалась с помощью метода ЛП_τ - поиска. Составлена схема численного решения оптимизационной задачи с использованием трех критериев:

Критерий 1 - энергетический критерий, мощность на валу электрического двигателя привода при отсутствии управляющего сигнала на обмотках ЭМП : $N_{дв} = Q \cdot p$, где Q – подача насоса, p – давление, развиваемое насосом.

Критерий 2 - функционал качества переходного процесса I , вычисленный по формуле

$$I = \int_0^{t_K} |Y_{шт}(t) - Y_{уст}| \cdot t \cdot dt$$

, где t_K – время интегрирования, $Y_{уст}$ – координата привода в конце переходного процесса, $Y_{шт}(t)$ – положение штока гидроцилиндра в момент времени t .

Критерий 3 - информационно-энергетический критерий, характеризующий затраты энергии в ИД к затратам энергии в информационном канале при переходном процессе.

$$K_E = \frac{\int_0^{t_K} |m_o \cdot Y_4(t) \cdot Y_5(t)| \cdot dt}{\int_0^{t_K} |(U_{вх} - K_{пос} Y_6(t)) \cdot Y_1(t)| \cdot dt}$$

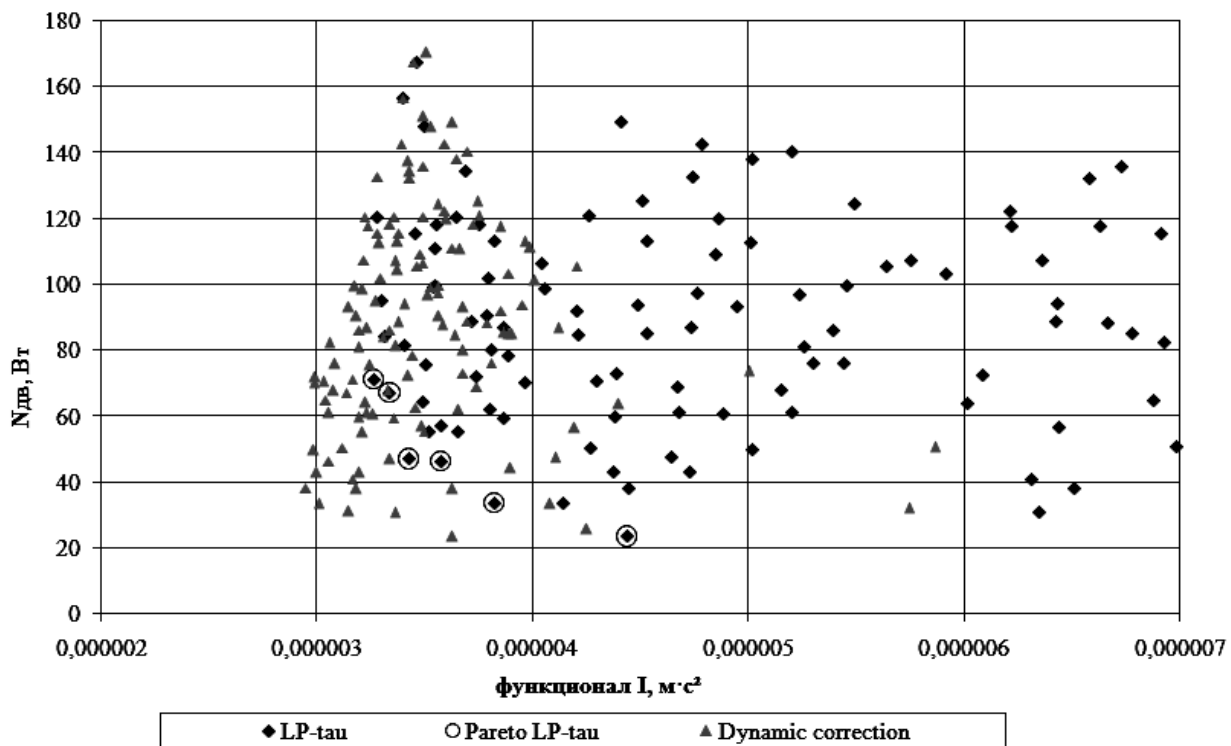


Рис.6. Оптимизация по конструктивным параметрам и оптимизация по алгоритму управления

В результате численного эксперимента, рис. 6 показано, что параметры коэффициентов обратной связи по положению, скорости, ускорению влияют на значения динамического показателя качества и должны приниматься во внимание при оптимизации конструкции.

В численном эксперименте, на примере АЭГП с золотниковыми плунжерами, был рассчитан 1024 вариант. На динамический критерий качества I наложено ограничение: его величина должна быть меньше $0,00005 \text{ м} \cdot \text{с}^2$. Это условие выполняется для 827 вариантов. Среди них требованиям ТЗ удовлетворяют 516 вариантов, не удовлетворяют - 311 вариантов. Из полученных точек сформировано парето-оптимальное множество, состоящее из выделенных точек. На рис. 7 оптимальные проектные варианты отмечены цифрами 1 и 2. Анализ гистограмм допустимых решений от варьируемых параметров позволяет найти рабочие диапазоны варьируемых параметров. Последовательным многократным решением задачи найдено оптимальное проектное решение.

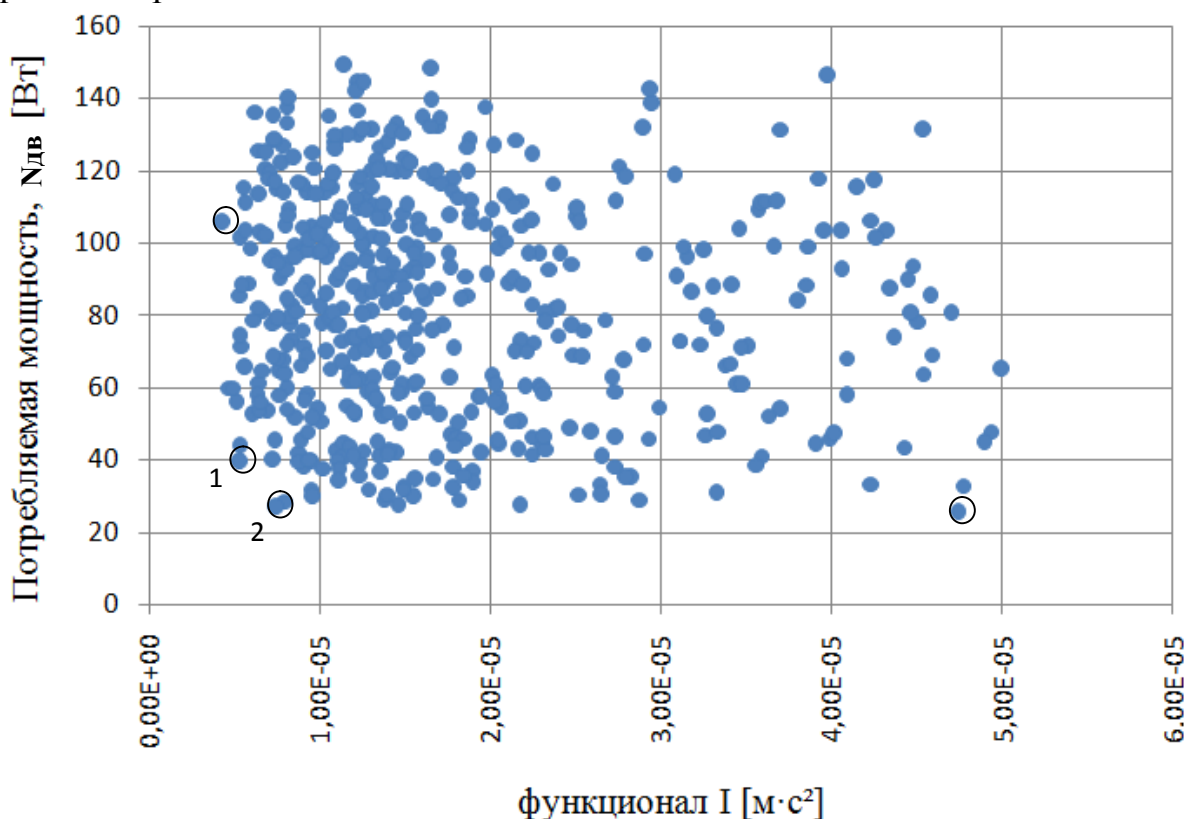


Рис. 7. Распределение критериев качества

Результаты расчетов для трех схем АЭГП показаны точками на рис. 8. Оптимальными проектными вариантами, с минимальными значениями критериев качества, являются выделенные точки А и Б, соответствующие схемам с золотниковыми плунжерами и плоским золотником. Для схемы со струйной трубкой лучшим проектным вариантом является точка В. Показатели качества переходного процесса аналогичны для всех трех схем, схема со

струйной трубкой уступает по энергетическим показателям в сравнении с двумя другими типами АЭГП.

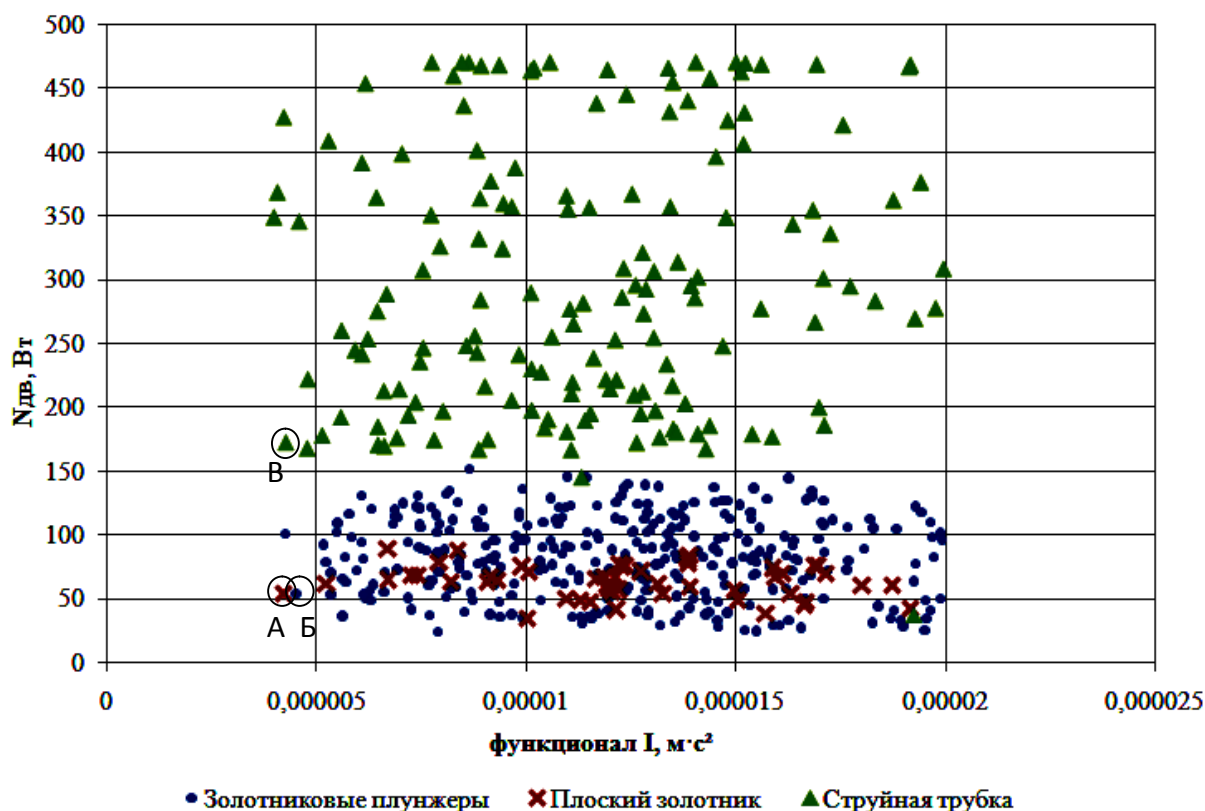


Рис.8. Критерии качества для трех схем АЭГП (критерии 1 и 2)

Для оптимальных проектных вариантов каждой из трех схем АЭГП построены графики переходных процессов, рис.9.

Графическое представление значений критериев качества наглядно в случае двух критериев. Для трех критериев качества распределение представляет собой поверхность, рис. 10, а парето-оптимальная кривая становится парето-оптимальной поверхностью. На рис. 11 приведены только 1 и 2 критерии качества: парето-оптимальные варианты не лежат на кривой. В этом случае основным инструментом выступает анализ таблиц испытаний.

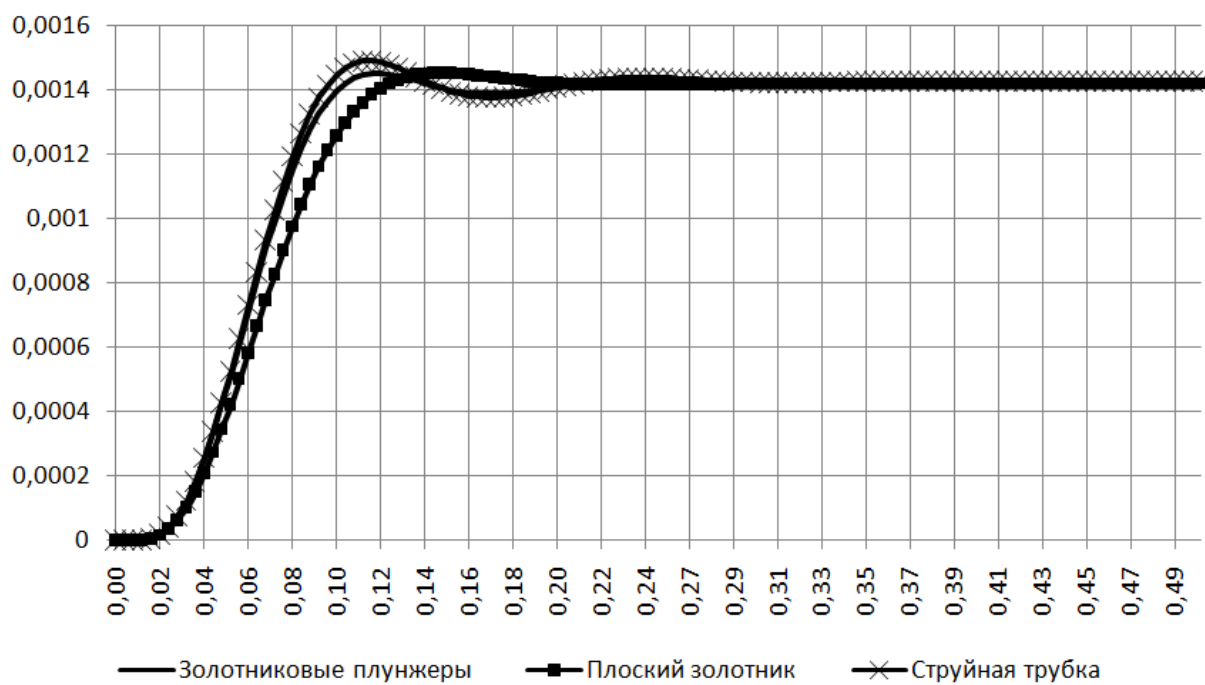


Рис.9. Графики переходных процессов оптимальных вариантов АЭГП

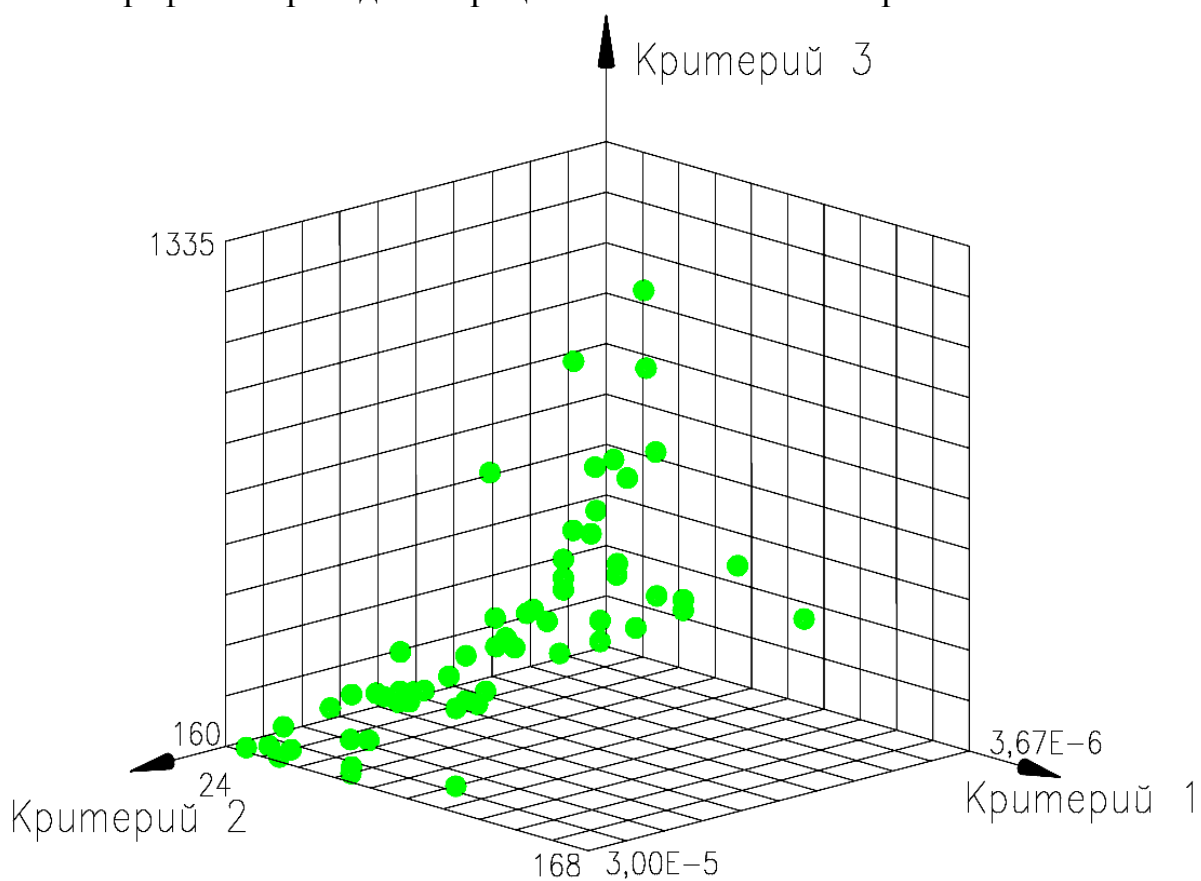


Рис.10. Критерии качества для схемы АЭГП с золотниковыми плунжерами

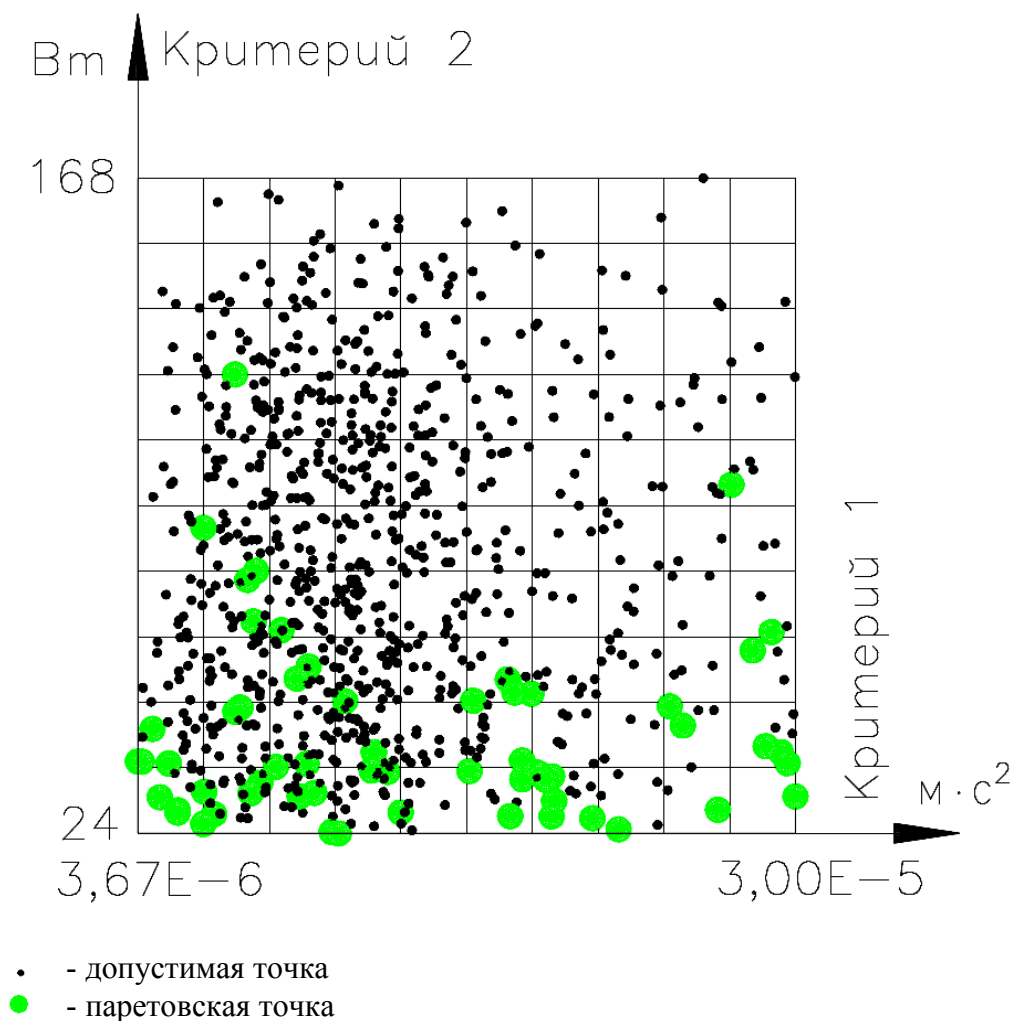


Рис.11. Критерии качества 1 и 2 для схемы АЭГП с золотниковыми плунжерами

В пятой главе описана методика оптимального проектирования АЭГП с золотниковыми плунжерами, с одноступенчатым гидравлическим усилением мощности сигналов управления. При разработке методики оптимального проектирования АЭГП использован программный комплекс MOVI 1.3 [Yanushkevich I., Statnikov A., Statnikov R. MOVI 1.3 Software Package. Certificate of Registration, United States Copyright Office, The Library of Congress. March 9, 2004.] и изложенные в главах 2, 3, 4 диссертации результаты математического моделирования, а также численных экспериментов АЭГП.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении изложены результаты проведенных исследований, которые состоят в следующем.

1. Разработаны объектно-ориентированные математические модели для оптимизации по многим критериям однокаскадных АЭГП.
2. Сравнение рассчитанных и экспериментальных частотных характеристик подтверждает адекватность линеаризованной математической модели АЭГП с золотниковыми плунжерами. Это сравнение, а также литературные данные о характеристиках двух других типов АЭГП показывают, что проведенный с помощью линейных математических моделей структурный и параметрический синтез информационных каналов АЭГП является обоснованным. При этом параметры энергетических каналов АЭГП оптимизируются по нелинейным уравнениям.
3. Предлагаемая методика позволяет находить наилучшие проектные варианты рассмотренных АЭГП. К таким вариантам относится АЭГП с золотниковыми плунжерами, что подтверждается многолетней практикой его применения.
4. Принятый для оптимизации однокаскадных АЭГП метод ЛП_т-поиска может быть также использован при проектировании более мощных следящих гидроприводов, имеющих два и более каскада усиления входного сигнала, а характеристики этих устройств являются нелинейными.
5. Разработанная в диссертации методика оптимального проектирования следящих АЭГП внедрена в учебный процесс.

Основные результаты диссертации отражены в перечисленных ниже работах

1. Малышев В.Н., Попов Д.Н. Многокритериальная оптимизация при выборе схемы и параметров автономного электрогидравлического привода // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 2008. - № 4. - С. 30-41.

2. Малышев В.Н., Попов Д.Н. Оптимальное проектирование автономного электрогидравлического привода // Приводная техника. – 2008. - № 6. - С. 32-36.

3. Малышев В.Н., Попов Д.Н., Сосновский Н.Г. Математическое моделирование и численное исследование характеристик автономного рулевого привода летательного аппарата // Гидромашины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика.: Тез. докл. всерос. студ. научно-техн. конф. – Москва, 2001. - С. 15.

4. Боровин Г.К., Малышев В.Н., Попов Д.Н. Математическое моделирование и оптимальное проектирование автономных электрогидравлических приводов. – Москва, 2003. - 24 с. (Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН; № 33).

5. Многокритериальная оптимизация автономного электрогидравлического следящего привода прямым адаптивным методом / А.П. Карпенко, В.Н. Малышев, Д.Н. Попов, В.А. Федин // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание, <http://technomag.edu.ru/doc/96813.html> . - Информрегистр № 0420800025\0045. – 2008. – Вып. 7 (июль).

6. Малышев В.Н., Попов Д.Н., Сосновский Н.Г. Идентификация автономного электрогидравлического следящего привода // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. Инженерное образование. <http://technomag.edu.ru/doc/66269.html> . - Информрегистр № 0420700025\0027. – 2007. - Вып. 6 (июнь).

7. Малышев В.Н., Жарков М.Н. Исследование допустимости линеаризации уравнений математической модели электрогидравлического привода // Гидравлические машины, гидропривод и гидропневмоавтоматика.: Тез. докл. студ. научно-техн. конф. – Москва, 2000. – С. 31.