

На правах рукописи

Белоногов Олег Борисович

МОДЕРНИЗАЦИЯ ДВУХДРОССЕЛЬНОГО
ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ
ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ВЕКТОРОМ ТЯГИ

Специальность. 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2010

Работа выполнена в Головном конструкторском бюро Ракетно-космической корпорации "Энергия" имени С.П.Королёва.

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Степан Георгий Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Попов Дмитрий Николаевич
кандидат технических наук, доцент
Селиванов Александр Михайлович

Ведущая организация – ЗАО «Арсенал-207»

Защита состоится " ____ " _____ 2010 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 в Московском Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005 г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5.

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

Ваши отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим выслать по указанному адресу.

Желающие присутствовать на защите должны заблаговременно известить совет письмами заинтересованных организаций на имя председателя совета.

Телефон для справок: (8-499) 263-69-49

Автореферат разослан " ____ " _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.А.Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы обусловлена тем, что характеристики двухдроссельных электрогидравлических усилителей (ЭГУ) для систем управления вектором тяги (СУВТ) по причине своих конструктивных особенностей могут существенно отличаться от характеристик традиционных ЭГУ. В частности, известное в ракетостроении размещение золотниковых плунжеров в полых вращающихся осях трехшестеренных насосов рулевых машин (РМ), исполняющих роль гильз, в значительной степени влияет на демпфирование золотниковых плунжеров ЭГУ, на пропускную способность их дроссельных окон и на значение гидравлических сил, действующих на золотниковые плунжеры. Такие гидравлические силы практически не были исследованы, что вызывало трудности при создании математических моделей ЭГУ и приводило к ошибкам, как при их проектировании, так и при проектировании систем управления. Поэтому, очень важно иметь наиболее полное знание условий возникновения этих сил и найти способы управления ими. Кроме того, РМ ракетных блоков работают, как правило, в экстремальных условиях эксплуатации, характеризующихся широкими диапазонами изменения температуры окружающей среды и напряжения электропитания. Эти условия эксплуатации искажают характеристики ЭГУ и могут приводить к нештатным ситуациям в СУВТ. Следовательно, несмотря на многолетний опыт применения двухдроссельных ЭГУ, исследования происходящих в них процессов с целью получения математических моделей, адекватных реальным устройствам, при экстремальных условиях эксплуатации, являются актуальными.

Цель работы и задачи исследования. Цель работы состояла в исследовании рабочих процессов в двухдроссельном ЭГУ современных РМ с разработкой новых методов и средств проведения таких исследований. Результаты исследований были направлены на создание математических моделей и программных средств расчета статических и динамических характеристик двухдроссельного ЭГУ, РМ и СУВТ для нормального и экстремальных условий эксплуатации. Кроме того, исследования были ориентированы на модернизацию двухдроссельного ЭГУ с выработкой рекомендаций по улучшению конструкции золотниковых гидрораспределителей (ГР) ЭГУ для облегчения регулировки РМ и обеспечения СУВТ устройствами, работающими при экстремальных условиях эксплуатации.

Для достижения указанной цели в данной работе решались следующие основные задачи: 1) анализ схемных и конструктивных особенностей двухдроссельного ЭГУ РМ; 2) исследование рабочих процессов, протекающих при функционировании компонентов двухдроссельного ЭГУ РМ; 3) создание подробных математических моделей двухдроссельного ЭГУ РМ, адекватных

реальному, при нормальном и экстремальных режимах эксплуатации; 4) проведение структурно – параметрического синтеза для выбора параметров двухдроссельного ЭГУ, РМ и СУВТ, с учетом гидростатических и гидродинамических сил, действующих на золотниковые плунжеры ЭГУ, при нормальном и экстремальных режимах эксплуатации; 5) исследование чувствительности РМ к изменению конструктивных и регулировочных параметров двухдроссельного ЭГУ с выработкой мероприятий по модернизации конструкции РМ для облегчения её регулировки.

Методы исследования. При решении перечисленных выше задач в работе использовался математический аппарат для решения систем нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений при расчетах статических характеристик ЭГУ и РМ, теории решения систем дифференциальных уравнений при расчетах динамических характеристик РМ и СУВТ, методы теории регрессии при аппроксимации получаемых характеристик, методы теории подобия и размерностей в гидромеханике, а также теории автоматического регулирования.

Проверка теоретических результатов осуществлялась путем численных экспериментов с использованием компьютерных моделей и проведением экспериментальных исследований реальных устройств, входящих в состав СУВТ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан и применен метод расчета частотных характеристик СУВТ и её компонентов с заданной точностью вычислений и за минимальное время. Согласно разработанному методу процесс интегрирования дифференциальных уравнений математической модели объекта на данной частоте входного моногармонического сигнала производится до тех пор, пока средние вычисляемые значения амплитуды и фазового запаздывания выходных сигналов не станут достаточно постоянными, т.е. до тех пор, пока разности между вновь вычисленными средними значениями амплитуды и фазового запаздывания выходных сигналов и предыдущими значениями этих параметров не станут по модулю меньше наперед заданных числовых значений погрешностей вычислений;

- разработан и применен метод структурно-параметрического синтеза типового узла управления (УУ) ЭГУ РМ заключающийся в экспериментальном определении статических характеристик УУ, определении амплитудных и фазовых частотных характеристик электрической и механической частей УУ при заторможенном и свободном валике электромеханического преобразователя с последующим проведением идентификации параметров по предлагаемой методике. С помощью разработанного метода получены структуры нелинейной и линеаризованной математических моделей УУ и проведена идентификация их параметров;

- разработан и применен метод структурно-параметрического синтеза гидрораспределителя (ГР) ЭГУ РМ заключающийся в экспериментальном исследовании его рабочих процессов и получении аналитических зависимостей математической модели ГР, при этом разработаны и применены новые способы, методы и средства проведения экспериментальных исследований ГР;

- разработана подробная нелинейная математическая модель динамики ЭГУ, учитывающая местные магистральные сопротивления и силы, действующие на его подвижные элементы, при этом путем применения закона сохранения количества движения впервые получены предлагаемые математические модели составляющих этих сил;

- разработаны и применены итерационные методы расчета статических характеристик двухдроссельного ЭГУ, в основу которых положены подробные нелинейные математические модели статики и разработанная модификация метода Зейделя для решения жестких систем нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений. С помощью применения разработанных методов расчета статических характеристик определены экстремальные режимы эксплуатации ЭГУ;

- разработаны и применены методы структурно-параметрического синтеза ЭГУ, РМ и СУВТ, в результате чего получены упрощенные нелинейные математические модели этих объектов для нормального и двух экстремальных режимов эксплуатации, пригодные для автоматизированного моделирования и анализа;

- разработаны и применены методы расчета статических характеристик РМ, пригодные для подтверждения адекватности её математической модели и исследования влияния конструктивных и регулировочных параметров ЭГУ на статические характеристики РМ;

- исследована чувствительность статических характеристик РМ к изменениям конструктивных и регулировочных параметров двухдроссельного ЭГУ. В результате проведенных исследований определены пути модернизации ЭГУ для получения требуемых характеристик РМ и СУВТ, работающих в экстремальных условиях эксплуатации.

Положения, выносимые на защиту:

- метод расчета частотных характеристик СУВТ и её компонентов с заданной точностью вычислений и за минимальное время;

- метод синтеза параметров математической модели типового УУ ЭГУ РМ;

- метод синтеза параметров математической модели ГР ЭГУ РМ;

- подробная нелинейная математическая модель динамики двухдроссельного ЭГУ, учитывающая местные магистральные сопротивления и силы, действующие на подвижные элементы ЭГУ;
- итерационные методы расчета статических характеристик двухдроссельного ЭГУ;
- структуры и методы синтеза параметров упрощенных нелинейных математических моделей двухдроссельного ЭГУ и СУВТ, а также упрощенная нелинейная математическая модель РМ для нормального и двух экстремальных режимов эксплуатации;
- методы расчета статических характеристик РМ (итерационный метод и метод «автоинтегрирования»);
- результаты исследования чувствительности статических характеристик РМ к изменениям конструктивных и регулировочных параметров двухдроссельного ЭГУ;
- рекомендации по улучшению конструкции двухдроссельного ЭГУ РМ для СУВТ.

Практическая ценность работы заключается:

- в создании новых устройств ЭГУ РМ, защищенных патентами РФ, применение которых в ракетостроении обеспечивает возможность получения требуемых характеристик РМ и СУВТ, работающих в экстремальных условиях;
- в возможности прогнозировать возникновение автоколебаний в СУВТ ракетных блоков и проводить мероприятия по их устранению;
- в возможности осуществлять экспертную оценку работы СУВТ в процессе эксплуатации.

Использование разработанных математических моделей ЭГУ позволяет повысить адекватность математических моделей РМ и СУВТ, а, следовательно, повысить точность расчетов как статических характеристик РМ, так и динамических характеристик РМ и СУВТ в целом.

Реализация и внедрение результатов работы. Представленные в данной диссертации математические модели ЭГУ применялись при расчетах статических и динамических характеристик РМ и СУВТ в процессе разработки, создания и летных испытаний многоразового транспортного космического корабля «Буран» и разгонных блоков ДМ-SL и ДМ-SLB, а предложенные новые устройства внедрены в рулевой машине 11Л221К.0-0 РБ ДМ и в модернизированном варианте рулевой машины 11Л221К.0-0 SL РБ ДМ-SL. Достоверность результатов расчетов, проведенных с использованием математических моделей ЭГУ РМ подтверждена результатами стендовых и летно-конструкторских испытаний орбитального корабля "Буран" и разгонных блоков ДМ, ДМ-SL и ДМ-SLB.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на научно - техническом совете отделения 04 РКК «Энергия», на 9 и на 10 отраслевых научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов в РКК «Энергия», на всесоюзной конференции «Гидравлика и гидропневмопривод машин, автоматов и промышленных роботов в машиностроении» (г. Севастополь, 1990 г.), на международной научно-технической конференции «Гидропневмоавтоматика и гидропривод» (г. Ковров, 1995 г.) и на международной конференции «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении» (г. Саратов, 1997 г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 работы, из них: статей – 16, при этом одна в рецензируемом журнале "Космонавтика и ракетостроение", патентов на изобретение РФ - 7, тезисов докладов - 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и пяти приложений. Работа содержит 220 страниц машинописного текста, иллюстрированного 70 рисунками на 47 страницах и имеет 36 таблиц на 24 страницах, при этом пять приложений занимают 23 страницы. Список литературы включает 61 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, сформулирована цель работы, изложены пути ее достижения и методы исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту, и приведено краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава содержит результаты информационного поиска и анализа схемно-конструктивных решений и особенностей функционирования двухдроссельного ЭГУ. Отмечается, что непосредственное определение коэффициентов сжатия потоков ε для дроссельных окон некруглой формы практически невозможно. Кроме этого, приводимые в существующей отечественной и зарубежной научно-технической литературе экспериментальные данные по углам истечения потоков β весьма отличаются, а иногда и просто противоречат друг другу. Поэтому для их определения возникает необходимость разработки оригинальных методов.

В основу исследований рабочих процессов и разработки математической модели двухдроссельного ЭГУ автором положены:

- принципы комплексного моделирования физических свойств рабочих жидкостей, разработанные автором совместно с М.Н.Жарковым, С.Р.Кристалным,

В.В.Кудрявцевым и В.И.Шутенко и приведенные в работе [13]. Лично автором найдены аппроксимирующие функции и выполнена аппроксимация.

- модификация метода Зейделя для решения жестких систем нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений математических моделей статики рулевых машин, электрогидравлических усилителей, их компонентов и рабочих процессов, разработанная автором совместно с М.Н.Жарковым [10]. Лично автором предложены итерационные формулы данной модификации метода и формула оценки точности;

- итерационные методы расчета параметров течений рабочей жидкости в соединительных, дроссельных и запорных элементах РМ, разработанные автором совместно с М.Н.Жарковым, В.В.Кудрявцевым и В.И.Шутенко, приведенные в работе [14]. Лично автором предложены итерационные системы уравнений метода;

- обобщенная математическая модель и методы идентификации параметров электронасосных агрегатов (ЭНА) автономных рулевых машин, разработанные автором совместно с М.Н.Жарковым, В.В.Кудрявцевым и В.И.Шутенко и приведенные в работе [15]. Лично автором разработаны методы идентификации параметров математической модели ЭНА;

- разработанный автором совместно с Д.С. Белицким, М.Н.Жарковым, Ю.А.Зориным, В.В.Кудрявцевым и В.И.Шутенко метод «автоинтегрирования» [4] для расчета частотных характеристик СУВТ и её компонентов. В соответствии с этим методом расчет частотных характеристик базируется на численном решении дифференциальных уравнений математических моделей исследуемых объектов при моногармонических входных воздействиях на фиксированных частотах и анализе реакций объектов на эти воздействия методом Фурье. Отличительной особенностью разработанного метода является то, что процесс интегрирования дифференциальных уравнений математической модели объекта на данной частоте входного моногармонического сигнала производится до тех пор, пока средние вычисляемые значения амплитуды A_c и фазового запаздывания φ_c выходных сигналов не станут достаточно постоянными, т.е. до тех пор, пока разности между вновь вычисленными средними значениями амплитуды и фазового запаздывания выходных сигналов и предыдущими значениями этих параметров не станут по модулю меньше наперед заданных числовых значений ε . Метод позволяет рассчитывать частотные характеристики динамических объектов с заданной точностью и позволяет сокращать время расчетов. Лично автором предложен алгоритм этого метода.

Дается постановка общей проблемы и задач исследований.

Вторая глава посвящена исследованию рабочих процессов в компонентах двухдроссельного ЭГУ. Предлагается метод структурно-параметрического

синтеза узла управления (УУ) ЭГУ, разработанный автором совместно с В.Ю.Григорьевым, М.Н.Жарковым и Ю.А.Зориным [12] (лично автором определены статические характеристики УУ, проведены расчеты динамических характеристик УУ, разработан метод и выполнен структурно-параметрический синтез УУ).

С помощью предлагаемого нового устройства [5, 6], содержащего плоскую модель золотникового ГР, выполненную в масштабе, определяются углы наклона потоков рабочей жидкости в его рабочей и сливной камерах (т.е. перед и за дроссельными окнами прямоугольной и сегментной формы) при различных относительных открытиях дроссельных окон для ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения. Конструкция устройства обеспечивает индикацию углов наклона потоков, близких к интегральным не только по величине открытия дроссельного окна, но и по глубине соответствующей камеры.

С помощью нового экспериментально – аналитического способа определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового ГР [7] определяются зависимости изменения углов истечения потоков, вычисляемых по формуле $\beta = (\beta_{\text{вх}} l_{\text{вх}} + \beta_{\text{вых}} l_{\text{вых}}) / (l_{\text{вх}} + l_{\text{вых}})$, где $\beta_{\text{вх}}$ и $\beta_{\text{вых}}$ - углы наклона потоков перед и за дроссельным окном; $l_{\text{вх}}$, $l_{\text{вых}}$ - глубины камер перед и за дроссельным окном, от относительного открытия дроссельных окон прямоугольной и сегментной формы при стационарных гильзах для ламинарного, турбулентного и переходных режимов течения (смотри рис. 1). Предлагается сплайн-интерполяции-экстраполяции зависимостей углов истечения потоков в сечениях сливных дроссельных окон прямоугольной ($\beta_{\text{с.п}}$) и сегментной ($\beta_{\text{с.с}}$) формы от относительного открытия дроссельных окон (χ):

$$\beta_{\text{с.п}} = \beta_{\text{л.с.п}} + K_{\text{Re}} (\beta_{\text{т.с.п}} - \beta_{\text{л.с.п}}); \quad \beta_{\text{с.с}} = \beta_{\text{л.с.с}} + K_{\text{Re}} (\beta_{\text{т.с.с}} - \beta_{\text{л.с.с}});$$

где $\beta_{\text{л.с.п}} = spl(\chi)$ - угол истечения потока в сечении сливного дроссельного окна прямоугольной формы при ламинарном режиме течения рабочей жидкости; $\beta_{\text{л.с.с}} = spl(\chi)$ - угол истечения потока в сечении сливного дроссельного окна сегментной формы при ламинарном режиме течения рабочей жидкости; $\beta_{\text{т.с.п}} = spl(\chi)$ - угол истечения потока в сечении сливного дроссельного окна прямоугольной формы при турбулентном режиме течения рабочей жидкости; $\beta_{\text{т.с.с}} = spl(\chi)$ - угол истечения потока в сечении сливного дроссельного окна сегментной формы при турбулентном режиме течения рабочей жидкости. Коэффициент K_{Re} в зависимости от неполного числа Рейнольдса Re^* (смотри рис. 2.) определяется следующим выражением:

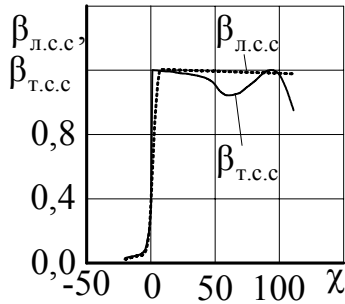


Рис. 1. Зависимости

$$\beta_{T.C.C} = \beta(\chi) \text{ и } \beta_{L.C.C} = \beta(\chi)$$

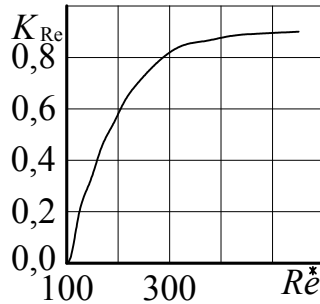


Рис. 2. Зависимость

$$K_{Re} = K_{Re}(Re^*)$$

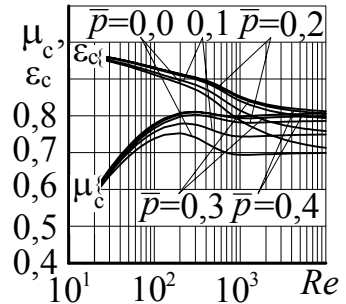


Рис. 3. Зависимости

$$\mu_c = \mu(Re, \bar{p}) \text{ и } \epsilon_c = \epsilon(Re, \bar{p})$$

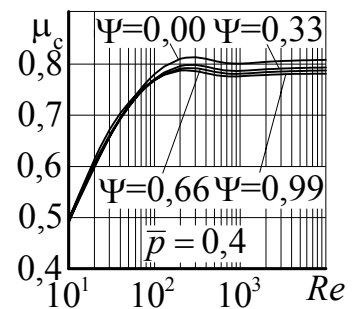
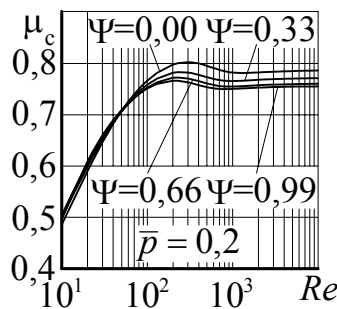
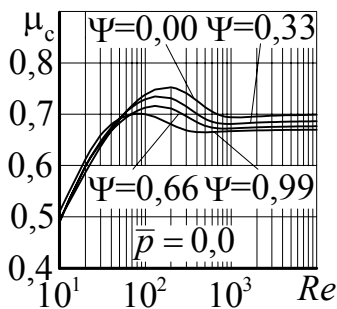


Рис.4. Зависимости $\mu = \mu(Re, \bar{p}, \Psi)$ для сегментного дроссельного окна

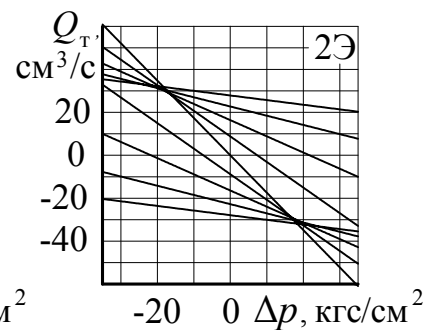
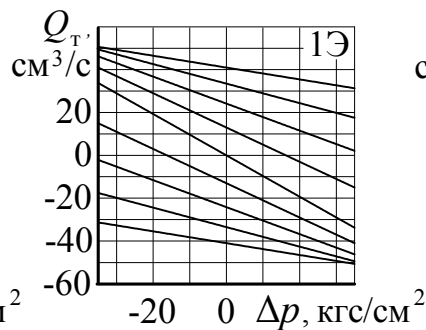
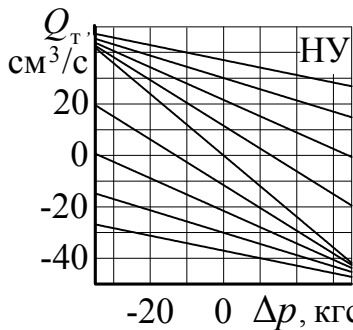


Рис. 5. Поля расходно-перепадных характеристик ЭГУ

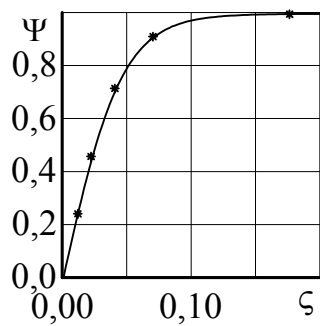
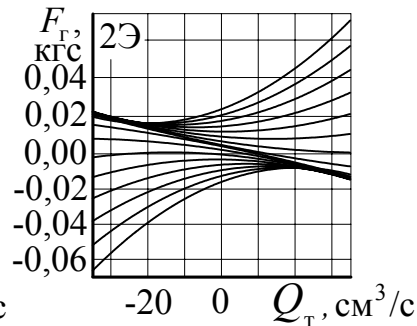
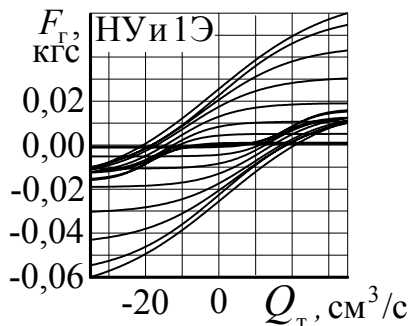


Рис. 6. Поля гидравлических сил

Рис. 7. Зависимость $\Psi = \Psi(\zeta)$

$$K_{Re} = \begin{cases} 0 & \text{при } Re^* \leq 100; \\ spl(Re^*) & \text{при } 100 < Re^* < 600; \\ 1 & \text{при } Re^* \geq 600. \end{cases}$$

Предлагается новый экспериментально – аналитический способ определения безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в прямоугольных и сегментных дроссельных окнах ГР со стационарными гильзами [8, 9]. Приводятся результаты экспериментально-аналитического определения зависимостей коэффициентов расхода μ_c и коэффициентов сжатия потоков ε_c от числа Рейнольдса Re и относительного противодавления \bar{p}_c (смотри рис. 3) и предлагается сплайн-интерполяция-экстраполяция этих зависимостей: $\mu_c = spl(Re, \bar{p}_c)$; $\varepsilon_c = spl(Re, \bar{p}_c)$. С помощью экспериментальной установки исследуется качественное влияние вращения гильз (осей насосов) на углы истечения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах ГР. Предлагается новый экспериментально-аналитический метод определения параметров течения потоков рабочей жидкости в сливных дроссельных окнах золотниковых ГР с вращающимися гильзами [3], с помощью которого впервые определяются зависимости коэффициентов расхода сливных дроссельных окон прямоугольной и сегментной формы μ_c от числа Рейнольдса Re , относительного противодавления на выходе \bar{p}_c и комплексного параметра, названного фактором вращения, Ψ (смотри рис. 4), а также углов истечения потоков в них от относительного открытия χ , неполного числа Рейнольдса Re^* и фактора вращения $\Psi: \beta_c = \beta_c(\chi, Re^*) + (\pi/2 - \beta)\Psi$, а с помощью теоремы размерностей Букингема устанавливаются математические модели этих зависимостей (рис. 7). Предлагаются математические модели и итерационные методы расчета безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых ГР со стационарными и вращающимися гильзами [3].

В третьей главе приводится вывод уравнений подробной нелинейной имитационной математической модели динамического режима работы двухдроссельного ЭГУ [2], пригодной для моделирования его работы в экстремальных условиях эксплуатации, включая уравнение для гидравлической силы F_Γ , действующей на его трубчатые золотниковые плунжеры ЭГУ. Эта сила представляется в виде суммы гидростатической силы $F_{Гс}$, стационарной составляющей гидродинамической силы $F_{Гдс}$ и нестационарной составляющей гидродинамической силы $F_{Гдн}$, т.е. $F_\Gamma = F_{Гс} + F_{Гдс} + F_{Гдн}$; [2], где:

$$\begin{aligned}
F_{\Gamma c} &= S_{\Gamma 1}(p_{\Gamma 1} - p_{\Gamma 2}) + S_{\Gamma 2}(p_{31} - p_{32}); \\
F_{\Gamma dc} &= \left[2S_{\kappa\Gamma}^2(p_{\Gamma 1} - p_{\Gamma 3}) \right] / \left[\sum_{i=1}^n \zeta_{\kappa\Gamma.i} + \lambda_{\kappa\Gamma 1}(l_{\kappa\Gamma}/d_{\kappa\Gamma}) \right] - \left[2S_{\kappa 3}^2(p_{\Gamma 1} - p_{31}) \right] / \\
&\left[\sum_{i=1}^n \zeta_{\kappa 3.i} + \lambda_{\kappa 3 1}(l_{\kappa 3}/d_{\kappa 3}) \right] - \left[2S_{\kappa\Gamma}^2(p_{\Gamma 2} - p_{\Gamma 4}) \right] / \left[\sum_{i=1}^n \zeta_{\kappa\Gamma.i} + \lambda_{\kappa\Gamma 2}(l_{\kappa\Gamma}/d_{\kappa\Gamma}) \right] + \\
&\left[2S_{\kappa 3}^2(p_{\Gamma 2} - p_{32}) \right] / \left[\sum_{i=1}^n \zeta_{\kappa 3.i} + \lambda_{\kappa 3 2}(l_{\kappa 3}/d_{\kappa 3}) \right] + \left[2m_{03}\mu_{031}^2 S_{03} p_{31} \cos(\theta/2) \right] / \varepsilon_{031} - \\
&\left[2m_{03}\mu_{032}^2 S_{03} p_{32} \cos(\theta/2) \right] / \varepsilon_{032} - \left[2n_{oc}\mu_{oc1}^2 S_{oc1} (p_{p1} - p_{\Gamma 1}) \cos(\beta_{oc1}) \right] / \varepsilon_{oc1} + \\
&\left[2n_{oc}\mu_{oc2}^2 S_{oc2} (p_{p2} - p_{\Gamma 2}) \cos(\beta_{oc2}) \right] / \varepsilon_{oc2} ; \\
F_{\Gamma dh} &= \rho_{\Gamma 1.\Gamma 3} L_{\Gamma} \dot{Q}_{\kappa\Gamma 1} - \rho_{\Gamma 1.31} L_{3} \dot{Q}_{\kappa 3 1} - \rho_{\Gamma 2.\Gamma 4} L_{\Gamma} \dot{Q}_{\kappa\Gamma 2} + \rho_{\Gamma 2.32} L_{3} \dot{Q}_{\kappa 3 2};
\end{aligned}$$

здесь p_{p1}, p_{p2} - давления в рабочих полостях ЭГУ; $p_{\Gamma 1}, p_{\Gamma 2}, p_{\Gamma 3}, p_{\Gamma 4}$ - давления в полостях гильз ЭГУ; p_{31}, p_{32} - давления в полостях золотников; $S_{\Gamma 1}, S_{\Gamma 2}$ - площади внешней и внутренней торцевых поверхностей золотникового плунжера; S_{03} - площадь проходного сечения отверстия золотникового плунжера; $\lambda_{\kappa\Gamma 1}, \lambda_{\kappa\Gamma 2}, \lambda_{\kappa 3 1}, \lambda_{\kappa 3 2}$ - коэффициенты соответственно гидравлических потерь на трение по длине каналов гильз и каналов золотниковых плунжеров; $\zeta_{\kappa\Gamma.1}, \dots, \zeta_{\kappa\Gamma.n}, \zeta_{\kappa 3.1}, \dots, \zeta_{\kappa 3.n}$ - соответственно коэффициенты местных гидравлических сопротивлений, обусловленных изменениями параметров русла каналов гильз и каналов золотниковых плунжеров; $S_{\kappa\Gamma}, S_{\kappa 3}$ - площади проходных сечений соответственно каналов гильз и каналов золотниковых плунжеров; S_{oc1}, S_{oc2} - площади проходных сечений сегментных дроссельных окон; $l_{\kappa\Gamma}, l_{\kappa 3}$ - длины соответственно каналов гильз и каналов золотниковых плунжеров; $d_{\kappa\Gamma}, d_{\kappa 3}$ - диаметры соответственно каналов гильз и каналов золотниковых плунжеров; $a_{\kappa c}$ - значение стороны квадратного сечения канала слива; μ_{oc1}, μ_{oc2} - коэффициенты расхода сегментных дроссельных окон; $\varepsilon_{oc1}, \varepsilon_{oc2}$ - коэффициенты сжатия потоков в сегментных дроссельных окнах; $\varepsilon_{031}, \varepsilon_{032}$ - коэффициенты сжатия потоков в отверстиях золотников; μ_{031}, μ_{032} - коэффициенты расхода отверстий золотниковых плунжеров; β_{oc1}, β_{oc2} - углы истечения потоков рабочей жидкости в сечениях

сегментных дроссельных окон золотникового ГР; $Q_{кг1}, Q_{кг2}$ - расходы рабочей жидкости через каналы гильз; $Q_{кз1}, Q_{кз2}$ - расходы рабочей жидкости через каналы золотников; $L_{Г}$ - эквивалентная длина демпфирования канала гильзы; $L_{з}$ - эквивалентная длина демпфирования канала золотникового плунжера; $X_{з}$ - перемещение золотникового плунжера.

Приводятся выводы уравнений нелинейных математических моделей и предлагаются методы расчета [2] предельной перепадной и расходной характеристик двухдроссельного ЭГУ РМ для моделирования его работы в экстремальных условиях эксплуатации, заключающиеся в последовательном решении систем нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений методом, изложенным в работе [10], при изменении командного тока $I_{к}$ от нуля до $I_{к.max}$ с шагом h_i , при этом при входе в итерационный процесс на каждом следующем шаге по командному току в качестве начальных значений вычисляемых параметров используются значения этих параметров, полученные на предыдущем шаге. Приводятся результаты экспериментальных исследований по определению статических характеристик двухдроссельного ЭГУ РМ [2]. Дается сравнение результатов моделирования и опытных данных, полученных на экспериментальной установке, включавшей рассматриваемый ЭГУ и источник его гидравлической мощности, в режиме нормальных климатических условий (режим НУ) эксплуатации и экстремальных режимах эксплуатации, чем подтверждается адекватность разработанных математических моделей.

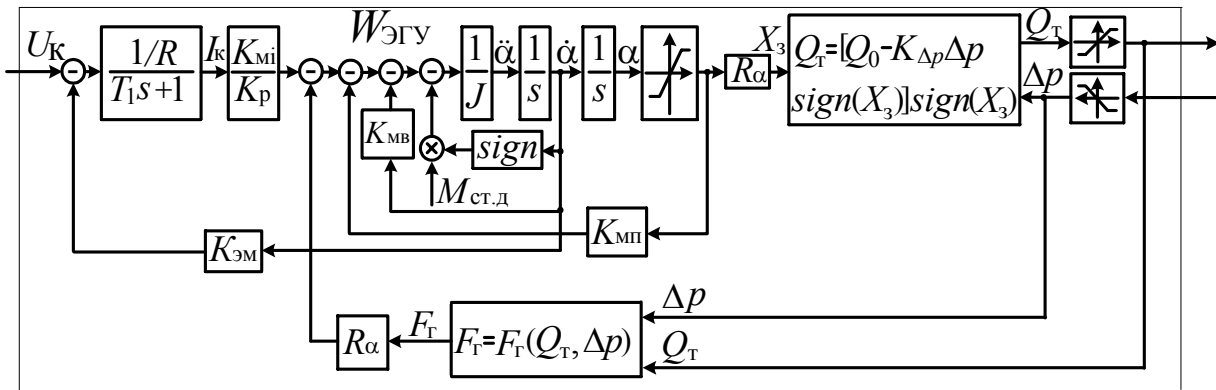
В результате экспериментальных и аналитических исследований установлено, что наиболее экстремальными режимами эксплуатации двухдроссельного ЭГУ являются следующие сочетания:

- 1) температура нормальных климатических условий и повышенное напряжение питания электродвигателя рулевой машины (режим 1Э)
- 2) пониженная температура и пониженное напряжение питания электродвигателя рулевой машины (режим 2Э).

В четвертой главе излагаются предлагаемые методы структурно-параметрического синтеза двухдроссельного ЭГУ, РМ и СУВТ. Результатами синтеза является создание упрощенных математических моделей этих устройств для нормального и двух экстремальных режимов эксплуатации, учитывающих гидростатические и гидродинамические силы, действующие на золотниковые плунжеры ГР двухдроссельного ЭГУ [11]. При этом для всех рассматриваемых режимов эксплуатации расходно-перепадные характеристики аппроксимируются полиномами первой степени (смотри рис. 5) [11], а коэффициенты аппроксимации, в свою очередь, аппроксимируются полиномами второй степени. Зависимость

гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры со стороны обтекающих их потоков жидкости, от перепада давления между рабочими полостями и расхода между ними для нормального и первого экстремального режимов эксплуатации получена в виде функции смещенного гиперболического тангенса (смотри рис. 6), а коэффициенты аппроксимации, в свою очередь, аппроксимируются полиномами четвертой степени. Та же зависимость для второго экстремального режима получена в виде полинома второй степени (смотри рис. 6), как и её коэффициенты аппроксимации. Структуры упрощенных математических моделей двухдроссельного ЭГУ представлены на рис. 8. Приводятся выводы уравнений упрощенных математических моделей РМ с двухдроссельным ЭГУ и упрощенной математической модели СУВТ, построенных на базе уравнения баланса расходов в полостях силового гидроцилиндра РМ [11]. Динамические характеристики РМ рассчитываются предлагаемым методом автоинтегрирования [4]. Обобщенная структура полученной упрощенной математической модели СУВТ с РМ, содержащей двухдроссельный ЭГУ, представлена на рис. 9, а её экспериментальная и расчетная переходные характеристики на рис. 10.

Посредством проведения вычислительных экспериментов с использованием разработанного итерационного метода расчета статических характеристик РМ [16] исследуется чувствительность статических характеристик РМ к изменениям конструкционных и регулировочных параметров двухдроссельного ЭГУ. В результате экспериментов установлено, что только вариация параметра локальной толщины стенки гильзы в зоне дроссельных отверстий δ_r приводит к одновременному уменьшению тока трогания РМ и уменьшению скоростей движения её штока в рассматриваемом диапазоне командных токов (смотри рис. 11). На основании этого даются рекомендации по улучшению конструкции РМ с двухдроссельным ЭГУ, так как с помощью вариации параметра δ_r можно регулировать зону нечувствительности РМ и угол наклона её скоростной характеристики, т.е. изменять коэффициент усиления РМ, причём без увеличения энергопотребления. Для реализации полученного результата исследований предложены новые конструкционно-технические решения РМ, вращающиеся гильзы золотниковых плунжеров ЭГУ которых в зоне дроссельных отверстий содержат или пазы [17], или кольцевые канавки [18] (смотри рис. 12). Указанные конструкционно-технические решения внедрены в рулевой машине 11Л221К.0-0 и в её модернизированном варианте, устанавливаемых на разгонных блоках типа ДМ и ДМ-SL. Внедрение этих конструкционно-технических решений РМ в производство полностью подтвердило результаты проведенных исследований и существенно облегчило регулировку РМ.



Для режимов НУ и 1Э : $F_{\text{т}} = e h [g Q_{\text{т}} + h \text{sign}(\Delta p)] - i \text{sign}(\Delta p)$

для режима 2Э : $F_{\text{т}} = F_{\text{т}0} \text{sign}(\Delta p) + K_{\text{q}} Q_{\text{т}} + K_{\text{q}2} Q_{\text{т}}^2 \text{sign}(\Delta p)$

Рис. 8. Структуры упрощенных математических моделей ЭГУ

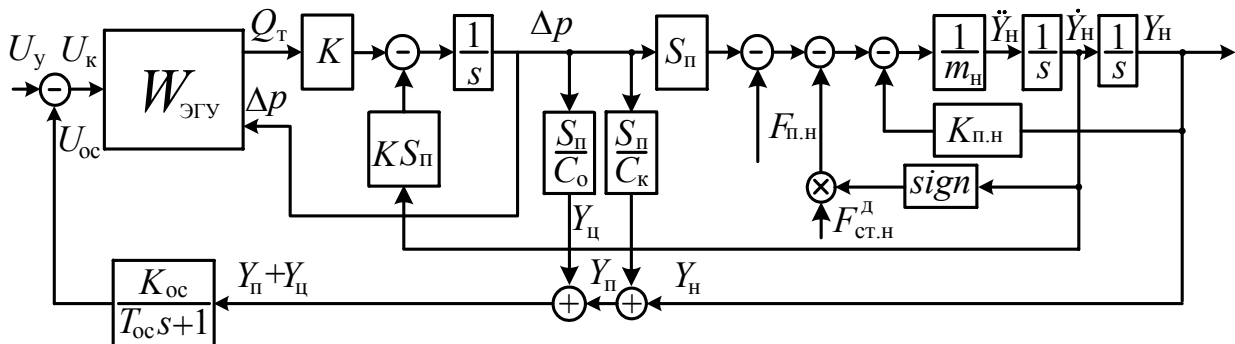


Рис. 9 Структура упрощенной математической модели СУВТ

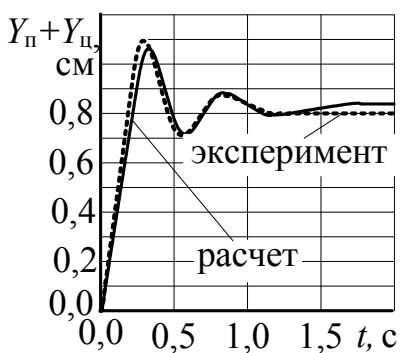


Рис. 10. Переходная характеристика СУВТ

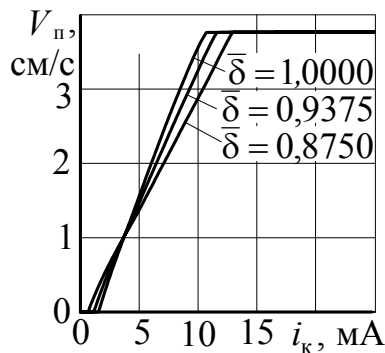


Рис. 11. Влияние \$\bar{\delta}\$ на скоростную характеристику РМ



Рис. 12. Варианты усовершенствования конструкции ЭГУ

В приложениях приведены коэффициенты аппроксимации основных физических свойств рабочей жидкости ЛЗ-МГ-2, таблицы значений углов истечения потоков в дроссельных окнах, таблицы значений безразмерных параметров потоков в дроссельных окнах, а также коэффициенты аппроксимации расходно-перепадных характеристик ЭГУ и характеристик зависимостей гидравлической силы, действующей на его золотниковые плунжеры, от расхода между рабочими полостями ЭГУ и перепада давлений между ними.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод расчета частотных характеристик СУВТ с заданной точностью вычислений и за минимальное время, пригодный для проведения расчетов её компонентов.

2. Разработан метод синтеза параметров математической модели типового узла управления ЭГУ РМ и синтезирована его структура.

3. Разработаны новые, защищенные патентами Российской Федерации на изобретение, устройства и способы исследования рабочих характеристик золотниковых ГР ЭГУ.

4. Впервые проведены исследования влияние вращения гильз золотниковых ГР на характеристики двухдроссельного ЭГУ, в результате которых установлено, что углы истечения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах вращающихся гильз ЭГУ РМ существенно выше значений углов истечения потоков в дроссельных окнах неподвижных гильз традиционных ЭГУ. По этой причине значения гидравлических сил, действующих на золотниковые плунжеры ЭГУ РМ, оказываются существенно меньшими, чем в традиционных ЭГУ.

5. Разработана теория и методы расчета процессов в двухдроссельных ЭГУ РМ, основанные на математических моделях течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых ГР со стационарными и вращающимися гильзами (осями насосов), а также итерационные методы расчета безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в каналах и трубопроводах ЭГУ и РМ.

6. Разработаны подробные нелинейные математические модели двухдроссельного ЭГУ для расчета динамических и статических характеристик.

7. Разработаны упрощенные математические модели ЭГУ, РМ и СУВТ, а также синтезированы структуры двухдроссельного ЭГУ и СУВТ, пригодные для автоматизированного моделирования и анализа.

8. Разработаны методы расчета статических характеристик автономных однокаскадных РМ (итерационный метод и метод «автоинтегрирования»).

9. Исследована чувствительность статических характеристик РМ к изменениям конструктивных и регулировочных параметров ЭГУ.

Выводы по результатам проведенных в диссертационной работе исследований:

- определена возможность проведения модернизации двухдроссельного ЭГУ для обеспечения требуемых характеристик РМ и СУВТ путем вариации параметра локальной толщины стенки гильзы ЭГУ (оси трехшестеренного насоса) в зоне дроссельных отверстий;

- предложены и внедрены в производство два новых устройства, защищенные патентами Российской Федерации на изобретение, позволяющие регулировать величину гидравлической силы, действующей на золотниковые плунжеры двухдроссельного ЭГУ. Внедрение этих устройств в производство позволило получать требуемые характеристики РМ и СУВТ, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, и облегчило регулировку РМ в цехе-изготовителе.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Белоногов О.Б. Исследование влияния конструкционных и регулировочных параметров электрогидравлического усилителя на статические характеристики рулевой машины // Космонавтика и ракетостроение. 2009. Вып. 3 (56). С. 169-173.

2. Белоногов О.Б. Методы расчета статических характеристик двухдроссельных и четырехдроссельных электрогидравлических усилителей // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 2005. Вып. 1. С. 56-99.

3. Белоногов О.Б. Экспериментальные исследования рабочих процессов простейших золотниковых гидрораспределителей рулевых машин // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 2005. Вып. 1. С. 25-55.

4. Методы расчета частотных характеристик систем управления вектором тяги ракетных двигателей / О.Б.Белоногов [и др.] // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3-4. С. 259-284.

5. Устройство для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя: пат. 2220332 РФ / О.Б.Белоногов, заявл. 21.01.2002; опубл. 27.12.2003. Бюлл. № 36.

6. Устройство для определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя: пат. 2262010 РФ / О.Б.Белоногов; заявл. 15.12.2003; опубл. 10.10.2005. Бюлл. № 28.

7. Способ определения углов истечения потоков рабочей жидкости в сечениях дроссельных окон золотникового гидрораспределителя: пат. 2329413 РФ / О.Б.Белоногов; заявл. 03.03.2006; опубл. 20.07.2008. Бюлл. № 20.

8. Способ определения характеристик безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей: пат. 2220333 РФ/ О.Б.Белоногов; заявл. 23.01.2002; опубл. 27.12.2003. Бюлл. № 36.

9. Способ определения характеристик безразмерных параметров течения потоков рабочей жидкости в дроссельных окнах золотниковых гидрораспределителей: пат. 2282065 РФ / О.Б.Белоногов; заявл. 26.01.2004; опубл. 20.08.2006. Бюлл. № 23.

10. Белоногов О.Б., Жарков М.Н. Модификация метода Зейделя для расчета статических характеристик рулевых машин и электрогидравлических приводов // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1997. Вып. 1. С. 5-28.

11. Белоногов О.Б., Жарков М.Н. Структурно-параметрический синтез и создание упрощенных математических моделей автономных однокаскадных рулевых машин и их функциональных трактов// Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 2005. Вып. 1. С. 100-120.

12. Структурно-параметрический синтез узла управления рулевой машины / О.Б.Белоногов [и др.] // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 2005. Вып. 1. С. 3-16.

13. Моделирование физических свойств рабочих жидкостей рулевых машин и гидроприводов / О.Б.Белоногов [и др.] // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1997. Вып.1. С. 107-117.

14. Итерационный метод расчета параметров течений рабочей жидкости в соединительных трубопроводах, каналах, проточных элементах и клапанах / О.Б.Белоногов [и др.] // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1997. Вып. 1. С. 97-106.

15. Обобщенная математическая модель и методы идентификации параметров электронасосных агрегатов автономных рулевых машин / О.Б.Белоногов [и др.] // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3-4. С. 26-56.

16. Методы расчета статических характеристик автономных однокаскадных двухдроссельных рулевых машин / О.Б.Белоногов [и др.] // Ракетно-космическая техника. Сер. XII. 1998. Вып. 3-4. С. 132-177.

17. Рулевая машина: пат. 2131827 РФ / О.Б.Белоногов, В.В.Чеканов; заявл. 20.04.1998; опубл. 20.06.1999. Бюлл. № 17.

18. Рулевая машина: пат. 2293687 РФ / О.Б.Белоногов, В.В.Чеканов; заявл. 01.02.2005; опубл. 20.02.2007. Бюлл. № 5.