

На правах рукописи

УДК. 62-522

Салман Мунзер

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ
СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ С ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ
ЗОЛОТНИКОВЫМ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЕМ**

Специальность 05.04.13 —гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2013

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Попов Дмитрий Николаевич

Официальные оппоненты: - доктор технических наук, профессор
Соколов Вячеслав Капитонович

- кандидат технических наук
Ситников Сергей Львович

Ведущая организация: **ЗАО «ВНИИстройдормаш», г. Москва**

Защита диссертации состоится « 9 » октября 2013г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д.1, ауд 314³(конф. Зал,каф.Э4)

Ваш отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: **105005, Бауманская ул., д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секр Д 212.141.16.**

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16,
кандидат технических наук, доцент

 **Колосов М.А.**



28.1

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электрогидравлические приводы с дроссельным регулированием широко применяются в различных областях техники для получения вращательных и поступательных движений звеньев механизмов. Управление ими осуществляется с помощью электрогидравлических усилителей (ЭГУ) с сервоуправлением или с пропорциональным управлением золотниковым распределителем.

В настоящее время для систем управления различными техническими объектами все более широкое применение находят электрогидравлические приводы с пропорциональными распределительными устройствами. Такие устройства дешевле электрогидравлических усилителей (ЭГУ) с сервоуправлением. Они надежнее в эксплуатации благодаря меньшей чувствительности к загрязнению рабочей жидкости и меньшему расходу рабочей жидкости при отсутствии сигналов управления. Однако эти устройства уступают ЭГУ по своим динамическим характеристикам. В диссертации рассмотрены задачи, сближения динамических и энергетических характеристик гидро-распределителя с пропорциональным управлением и ЭГУ с сервоуправлением. Одной из целесообразных областей использования электрогидравлических приводов с пропорциональным распределительным устройством, может быть транспортная и грузоподъемная техника. Таким образом, совершенствование электрогидравлических следящих приводов с пропорциональным управлением золотниковым распределителем является актуальной задачей.

Рассматриваются опубликованные теоретические исследования и экспериментальные исследования авторов: Асташев В. К., Башта Т. М., Гамынин Н. С., Голубев В. И., Ермаков С. А., Иванов Г. М., Ильин М. Г., Константинов С. В., Лещенко В. А., Литвин-Седой М. З., Навроцкий К. Л., Подураев Ю. В., Попов Д. Н., Редько П. Г., Свешкинов В. К., Селиванов А. М., Ситников С. Л., Смелъницкий С. Г., Соколов В. К., Сосновский Н. Г., Сосульников Г. Б., Трифонова Г. О., Фомичев В. М., Целищева К. А., Чернышев А. В., Шкапов П. М., Christoph Boes, Ikeba. Y, Nakada. T.

Цель работы и задачи: Улучшение энергических, статических и динамических характеристик привода с пропорциональным управлением распределительным устройством, а также, создание методики сравнения проектных решений гидроприводов с пропорциональным управлением и гидроприводов с сервоуправлением распределительным устройством.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Расчёт и проектирование следящего электрогидравлического привода с сервоуправлением золотниковым распределителем.
2. Расчёт осевой гидродинамической силы в золотниковых распределителях и исследование способов ее уравновешивания.
3. Расчёт радиальных сил, возникающих в золотниковых устройствах.
4. Расчёт и проектирование электрогидравлического усилителя с пропорциональным управлением золотниковым распределителем.

5. Разработка математической модели и расчёт динамических характеристик усилителя с пропорциональным управлением золотниковым распределителем.
6. Анализ и сравнение энергических, статических и динамических характеристик электрогидравлических следящих приводов (ЭГСП) с двумя типами ЭГУ.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись экспериментальные и теоретические методы исследований, которые базируются на фундаментальных методах математического моделирования процессов, происходящих в следящем электрогидравлическом приводе, методах проектирования современных систем управления, методов компьютерного моделирования при расчете переходных и частотных характеристик ЭГСП, на методе конечных элементов (ANSYS.13 - CFX). При численных экспериментах использован программный комплекс SolidWorks.

Научная новизна.

1. Определены гидродинамические нагрузки в золотниковом распределителе с помощью метода конечных элементов. Примененная компьютерная модель позволяет рассматривать пространственные течения рабочей жидкости (РЖ) в золотниковом распределителе.

2. Составлена математическая модель золотникового распределителя, обеспечивающая минимальное значение действующей на золотник гидродинамической силы.

3. Численно исследована чувствительность гидродинамической силы к технологическим изменениям размеров золотника.

4. Разработана математическая модель для расчёта переходного процесса в практически оптимальном золотниковом распределителе с пропорциональным управлением.

5. Проведено сравнение частотных характеристик гидроприводов снабженных ЭГУ с сервоуправлением и с пропорциональным управлением золотниковым распределителем.

Практическая значимость работы.

1. Представлена методикой усовершенствования ЭГУ с пропорциональным управлением золотниковым распределителем. С помощью этой методики ЭГУ с пропорциональным управлением золотниковым распределителем приближается к ЭГУ с сервоуправлением по своим статическим и динамическим характеристикам. При этом ЭГУ с пропорциональным управлением золотниковым распределителем потребляет меньше гидравлической энергии.

Достоверность результатов.

Обеспечена применением апробированной практикой современной теории электрогидравлических приводов с дроссельным регулированием, а также сравнением полученных при численных экспериментах гидродинамических сил в золотниковом распределителе с опубликованными в литературных источниках результатами физических экспериментов с такими устройствами. Кроме того, целесообразность уравнивания гидродинамических сил в золотниковых распределителях с пропорциональным управлением подтверждена дополнительными экспериментами проведенными на макете гидроусилителя.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и обсуждены на 4 докладах на кафедре гидромеханики, гидроприводов и гидропневмоавтоматики (Э-10) МГТУ имени Н. Э. Баумана.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатных работы в рекомендованных ВАК изданиях.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Диссертация написана на 128 стр., и содержит 85 рисунка, 4 таблиц и список литературы из 56 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформированы цель и задачи выполненных исследований, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава содержит краткий обзор материалов по вопросам расчета и проектирования электрогидравлических приводов с дроссельным регулированием, рассмотрены способы управления такими гидроприводами. В применяемых для управления приводами усилителях гидравлических сигналов выделены три группы:

1. С одной и несколькими ступенями усиления.
2. Конструкция управляющего элемента гидроусилителя может быть выполнена в виде золотника, с соплом заслонкой, со струйной трубкой, крановой, с игольчатым дросселем.
3. По способу формирования сигнала управления гидроусилителя подразделяют на усилители с механическим и электрическим сигналами управления.

Приведены также электрогидравлические усилители с сервоуправлением и с пропорциональным управлением золотниковым распределителем, которые представлены новым поколением пропорциональных клапанов распределителя и - распределителя с встроенной цифровой электроникой. Затем описаны методы уравнивания гидродинамических сил в золотником распределителе.

Приведены также выводы к главе и постановка задачи исследования. В электрогидравлическом приводе с сервоуправлением золотниковым распределителем входной сигнал после электронного усилителя (ЭУ) и электромеханического преобразователя (ЭМП) превращается в перемещение управляющих элементов (заслонки, струйной трубки) первой ступени электрогидравлического усилителя (ЭГУ). Вторая ступень ЭГУ имеет распределительный золотник, регулирующий поток жидкости под давлением, который подводится от источника энергоснабжения гидропривода (рис. 1). В ЭГУ с пропорциональным управлением распределительным золотником якорь ЭМП непосредственно соединен с золотником (рис. 2).

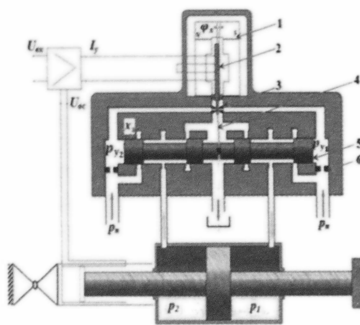


Рис. 1. Электрогидравлический привод с сервоуправлением золотниковым распределителем (ЭГУ с двумя ступенями усиления)

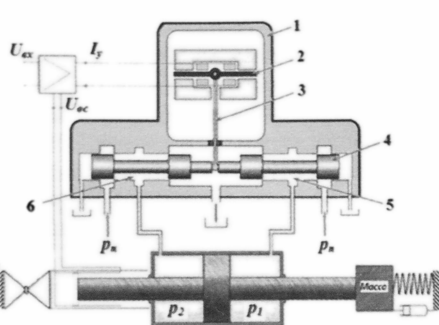


Рис. 2. Электрогидравлический привод с пропорциональным управлением золотниковым распределителем (ЭГУ с одной ступенью усиления)

Вторая глава посвящена математическим моделям для расчета сил, действующих в золотниковых распределителях. Сделан выбор размеров элементов гидропривода и вычислены указанные ниже исходные данные для расчета гидродинамической нагрузки на золотник с пропорциональным управлением с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

В 3D представлена модель золотника вместе с гильзой (рис. 3) и построены модели потока РЖ, подводимого в центре и по краям золотникового распределителя (рис. 4).

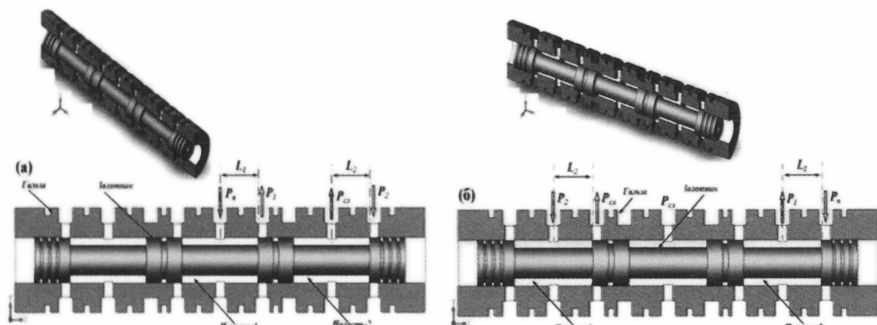


Рис. 3. 3D модель золотника вместе с гильзой, подвод жидкости в центре (а) и по краям золотника (б).

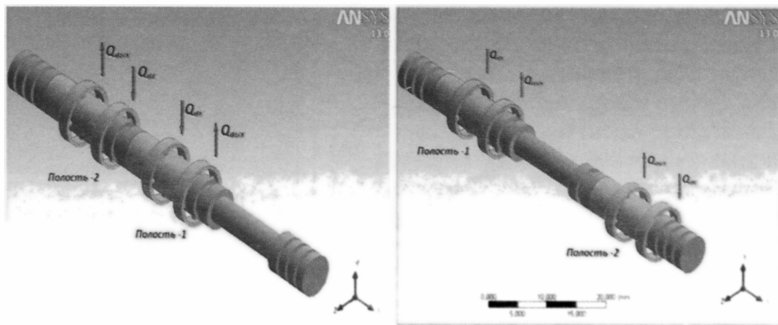


Рис. 4. 3D модели распределения потока РЖ в полостях золотника при подводе РЖ в центре золотника «а» и по краям золотника «б»

Расчётная сетка 3D модели потока РЖ для каждой полости золотника содержит 132538 элементов и 27125 узлов, (рис. 5).

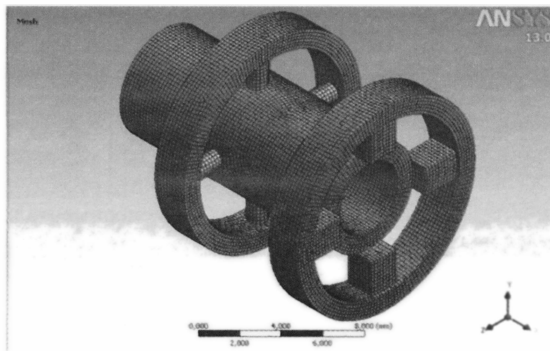


Рис. 5. 3D модель расчётной сетки распределения РЖ (132538 элементов и 27125 узлов).

После расчета гидродинамических осевых и радиальных сил, действующих на золотник, для каждой полости при нескольких смещениях золотника построены графики, эти графики показывают зависимости радиальных($Y.Z$) и осевых(X) сил, возникающих в каждой полости от смещения золотника диаметром 6 мм, при отсутствии разности давлений в выходных каналах золотникового распределителя. Там же приведены указанные зависимости радиальных($Y.Z$) и осевых(X) сил от смещения золотника. При разности давлений равной $\frac{2}{3} (P_n - P_{cl})$ в выходных каналах золотникового распределителя. Суммарная гидродинамическая сила приложенная к золотнику, получена при сложении сил, действующих на золотник в полостях 1 и 2 (рис 6)

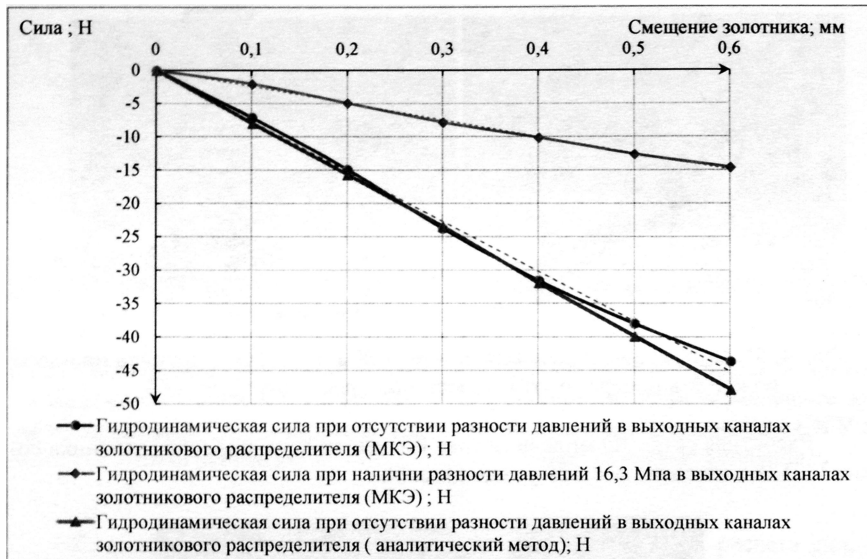


Рис. 6. Графики гидродинамических сил, полученных с помощью МКЭ и аналитическим методом, $d_3 = 6$ мм

Верификация расчёта гидродинамических сил с помощью МКЭ (ANSYS Workbench CTX) выполнена по результатам экспериментов, опубликованных в работе Смелъницкого С.Г. Графики расчетных и экспериментальных гидродинамических сил приведены на рисунке 7.

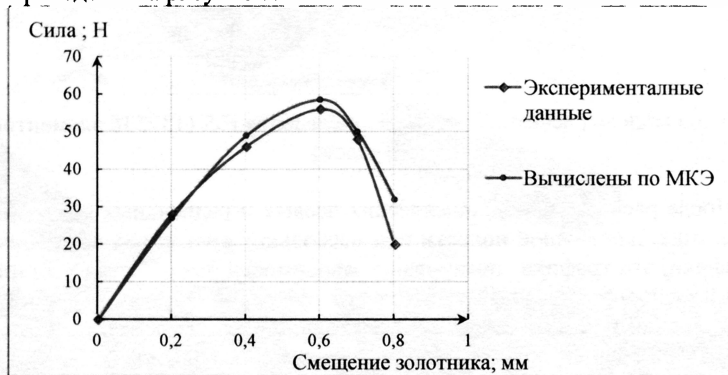


Рис. 7. Сравнение значений гидродинамической осевой силы, вычислены по МКЭ и экспериментальные данные Смелъницкого С.Г. для золотника $d_3 = 42,5$ мм

На рис.8. представлены виды потоков РЖ в полостях золотника $d_3 = 42,5$ мм при управлении течением на входе и на выходе распределителя, полученным с помощью МКЭ. Вид потоков аналогичен потокам, приведенным в работе Смелъницкого С.Г.

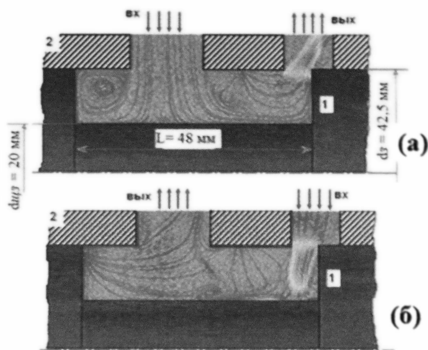


Рис.8. Виды потоков РЖ в полостях золотника при управлении течением на выходе (а) и на входе (б) распределителя

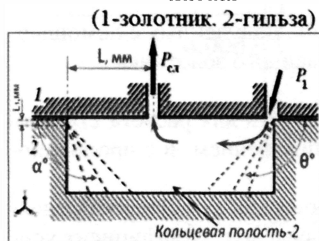


Рис. 9.а

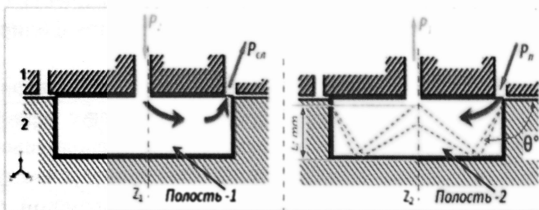


Рис. 9.б

На рис.10.а показана 3D модель золотника с профилированной поверхностью, давление питания подведено в центре золотника. На рисунке 10.б показана 3D модель золотника с профилированной поверхностью, давление питания подведено по краям золотника.

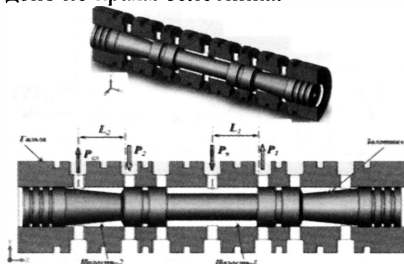


Рис. 10.а

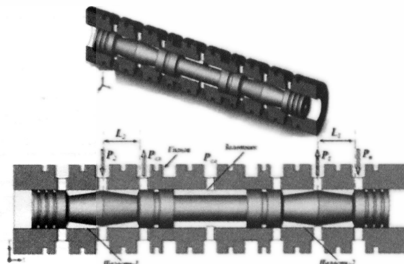


Рис. 10.б

В результате, была получена суммарная гидродинамическая осевая сила -26; Н для профилированного золотника. Для непрофилированного золотника, эта гидродинамическая осевая сила равна -46; Н с подводом жидкости в центре золотника (рис 11.а). В случае, когда золотник выполнен как на рис. 3.б с подводом жидкости по краям золотника, была получена суммарная гидродинамическая осевая

сила -24,5; Н для профилированного золотника. Для непрофилированного золотника, гидродинамическая осевая сила равна -46; Н (рис 11.6).

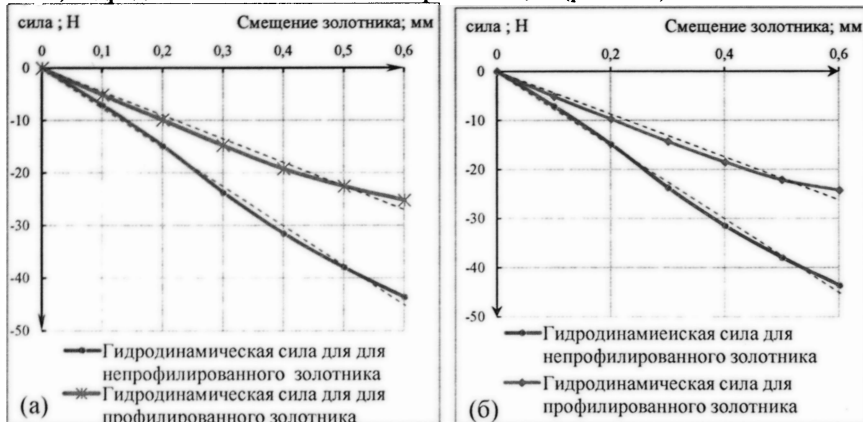


Рис.11. Сравнение осевых гидродинамических сил, полученных с помощью МКЭ для непрофилированного и профилированного золотника

В третьей главе рассмотрена математическая модель для расчета статических и динамических характеристик привода с сервоуправлением и с пропорциональным управлением золотниковым распределителем

В результате компьютерного моделирования проверена устойчивость электрогидравлического усилителя с соплом заслонкой, определен коэффициент усиления разомкнутого контура привода K . Для повышения быстродействия ЭГСП предусмотрены корректирующие устройства, которые в виде регуляторов включаются в цепь управления гидравлическим приводом. На рис. 12 показаны два замкнутых контура, основной 1 и внутренний контур 2, соответствующий ЭГУ с сервоуправлением золотниковым распределителем.

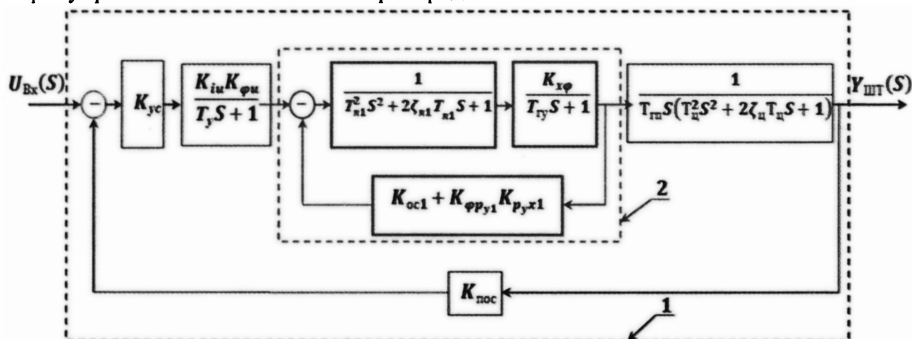


Рис. 12. Структурная схема электрогидравлического следящего привода (ЭГСП); электрогидравлический усилитель (ЭГУ) с соплом заслонкой имеет обратную связь от золотника к заслонке

Для контура 2 определены значения коэффициентов и постоянных времени которые даны ниже в таблице 1. Результат расчета переходного процесса для золотника с сервоуправлением представлн графикем на рисунке 13.

Таблица 1

$T_{я1}; \text{с}$	$\zeta_{я1}$	$K_{хф}; \text{м}$	$T_{г\gamma}; \text{с}$	$K_{х}; \text{рад/м}$
0,000336735	0,6	4,28598	0,02913	13,69782

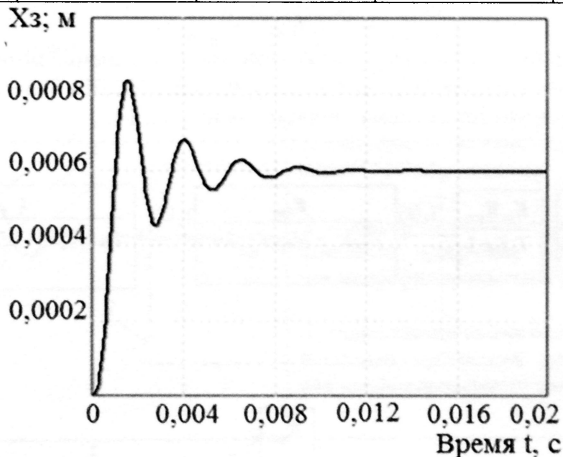


Рис.13. График переходного процесса для золотника с сервоуправлением

Электрогидравлический усилитель с пропорциональным управлением золотниковым распределителем рассмотрен на примере наиболее часто встречающегося в современных следящих приводах ЭМП с поворотным якорем. С помощью уравнения вращения твердого тела вокруг неподвижной оси получено

$$M_{я} - M_{тр} - P_{я} \cdot l_{я} = J_{я} \frac{d^2 \varphi_{я}}{dt^2}, \quad (1)$$

где

$M_{я}$ - момент, вызванный действием магнитного поля на якорь; $M_{тр}$ - момент, изгибающий разделительную трубку; $P_{я}$ - сила, действующая на якорь электромагнита; $l_{я}$ - расстояние между осью золотника центром вращения якоря; $J_{я}$ - момент инерции якоря и управляемого элемента относительно оси вращения якоря; $\varphi_{я}$ - угол отклонения якоря.

Уравнение движения управляемого золотника имеет вид.

$$m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + K_{тр.з} \frac{dx_3}{dt} + 2C_{гд} \cdot x_3 = P_{я}, \quad (2)$$

где

m_3 - масса управляемого элемента; x_3 - смещение золотника; $K_{тр.з}$ - коэффициент трения; $C_{гд}$ - коэффициент жесткости гидродинамической пружины.

Не учитывая магнитный гистерезис, внешнюю моментную характеристику преобразователя можно представить наклонными параллельными прямыми. Тогда ее уравнение записывается в виде

$$M_{я} - M_{тр} = K_{М1} \cdot i_y - K_{М\phi} \cdot \varphi_{я}, \quad (3)$$

где

$K_{М1}$ и $K_{М\phi}$ - коэффициенты изменения момента якоря соответственно для тока управления и угла отклонения якоря; i_y - ток управления.

$$x_3 = l_{я} \cdot \tan \varphi_{я} = l_{я} \cdot \varphi_{я}, \quad (4)$$

В изображениях по Лапласу записанные выше уравнения позволяют найти, с помощью которых находим передаточные функции. По этим передаточным функциям построена структурная схема, показанная на рис. 14.

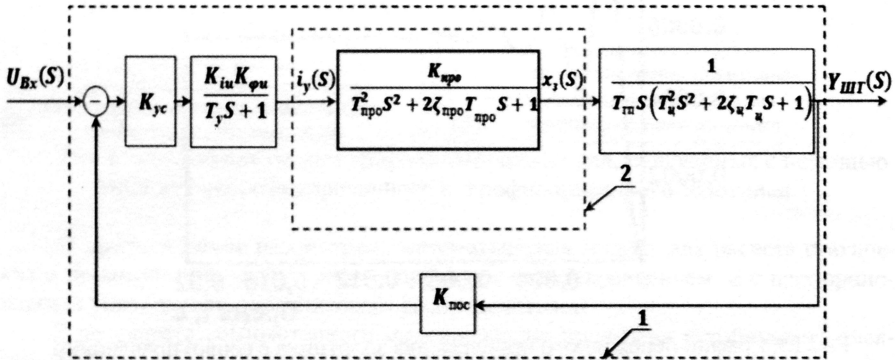


Рис. 14. Структурная схема электрогидравлического следящего привода; ЭГУ с пропорциональным управлением золотниковым распределителем

$$K_{про} = \frac{K_{М1} l_{я}}{(K_{М\phi} + 2l_{я}^2 \cdot C_{гд})}; \quad T_{про} = \sqrt{\frac{(l_{я}^2 \cdot m_3 + J_{я})}{(K_{М\phi} + 2l_{я}^2 \cdot C_{гд})}};$$

$$\zeta_{про} = \frac{l_{я}^2 \cdot K_{тр.з}}{2 \sqrt{\frac{(l_{я}^2 \cdot m_3 + J_{я})}{(K_{М\phi} + 2l_{я}^2 \cdot C_{гд})}} \cdot (K_{М\phi} + 2l_{я}^2 \cdot C_{гд})};$$

Так как от гидродинамических сил зависит ток управления, коэффициенты усиления были определены для трех случаев.

1. $P_{з.гд1}$ - гидродинамическая сила, вычислена аналитическим методом для непрофилированного золотника;
2. $P_{з.гд2}$ - гидродинамическая сила, вычислена с помощью метода конечных элементов (МКЭ) для непрофилированного золотника (был применен пакет ANSYS.13 CFX);
3. $P_{з.гд3}$ - гидродинамическая сила, вычисленная с помощью МКЭ для профилированного золотника (был применен пакет ANSYS.13 CFX);

Значения коэффициентов и постоянных времени даны ниже в таблице 2. Результаты расчета переходных процессов золотника с пропорциональным управлением представлена на рис. 15.

Таблица 2

	$i_y; A$	$K_{про}; M$	$T_{про}; c$	$\zeta_{про}$
1	0,840	$7,106 \cdot 10^{-4}$	$6,518 \cdot 10^{-4}$	0,189
2	0,786	$7,591 \cdot 10^{-4}$	$6,737 \cdot 10^{-4}$	0,195
3	0,468	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$8,858 \cdot 10^{-4}$	0,248

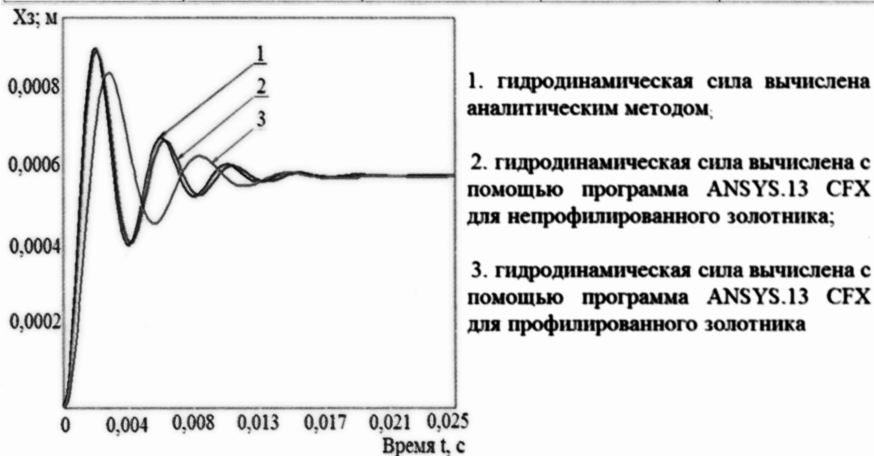


Рис.15. График переходного процесса для золотника с пропорциональным управлением

Для расчета переходных процессов в ЭГСП предварительно были вычислены коэффициенты усиления и постоянные времени контура¹ показных на рисунках 12 и 14. Эти величины могут быть определены по формулам, известным из динамики гидроприводов.

1-Эгу с сервоуправлением золотниковым распределителем.

2- ЭГУ с пропорциональным управлением золотниковым распределителем.

Соответственно первому (1) и второму (2) случаям в таблице 3 даны значения коэффициентов и постоянных времени.

Таблица 3

	$T_{гп}; c$	$T_{ц}; c$	$\zeta_{ц}$	$K_{пос}; B/M$	$K_{ус}$	$T_y; c$	$K_{iu}; A/B$	$K_{\phi i1}; рад/А$
1	$1,384 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	0,4	200	2,168	0,0048	$4 \cdot 10^{-3}$	0,938
2	$1,384 \cdot 10^{-3}$	$3,91 \cdot 10^{-3}$	0,4	200	2,168	0,018	0,01	2,327

Четвертая глава посвящена корректированию динамики электрогидравлического привода с пропорциональным управлением золотниковым распределителем.

После расчета переходных процессов сначала определены требуемые мощности электрических и гидравлических сигналов для ЭГУ с пропорциональным управлением. Затем приведено сравнение требуемых мощностей электрических и гидравлических сигналов для ЭГУ с сервоуправлением и с пропорциональным управлением (имеющего профилированный золотник). Результат такого сравнения представлены ниже в таблице 4.

Таблица 4

Мощность сигналов	ЭГУ с сервоуправлением	ЭГУ с пропорциональным управлением		
		$P_{з.гд1}$	$P_{з.гд2}$	$P_{з.гд3}$
$N_{эл}; BT$	0.108	10.08	9.423	5.616
$N_{гид}; BT$	9.302	-	-	-
$N_{\Sigma}; BT$	9.41	10.08	9.423	5.616

В таблице:

$N_{эл}$ - мощность электрического сигнала;

$N_{гид}$ - мощность гидравлического сигнала;

N_{Σ} - мощность, необходимая для управления ЭГУ;

$P_{з.гд1}$ - гидродинамическая сила, вычисленная аналитическим методом для непрофилированного золотника;

$P_{з.гд2}$ - гидродинамическая сила, вычисленная с помощью МКЭ для непрофилированного золотника;

$P_{з.гд3}$ - гидродинамическая сила, вычисленная с помощью МКЭ для профилированного золотника;

Приведены также результаты экспериментальных исследований статических характеристик ЭГУ с пропорциональным управлением и сделано их сравнение с аналогичными характеристиками ЭГУ с сервоуправлением золотниковым распределителем. Схема стенда для определения статических характеристик ЭГУ показана на рисунке 16. В эксперименте при различных уровнях входного сигнала определялись положение золотника и скорость вращения вала гидромотора, пересчитываемая затем в расход жидкости, протекающей через золотниковый распределитель.

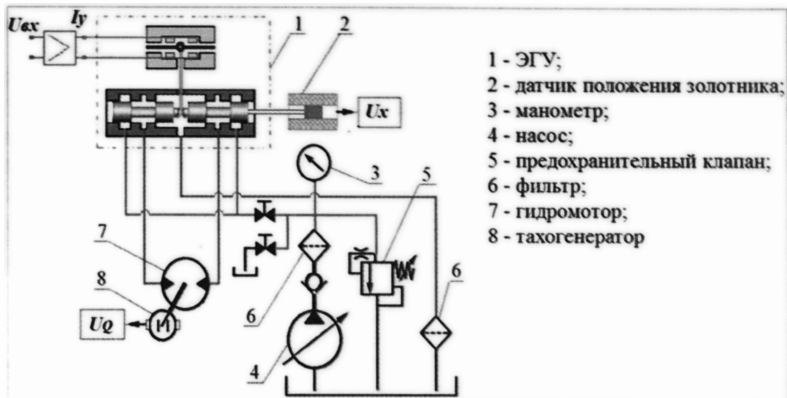


Рис. 16. Схема стенда для испытаний ЭГУ

На рисунке 17 представлены расходные характеристики ЭГУ, полученные при давлении питания 5 МПа.

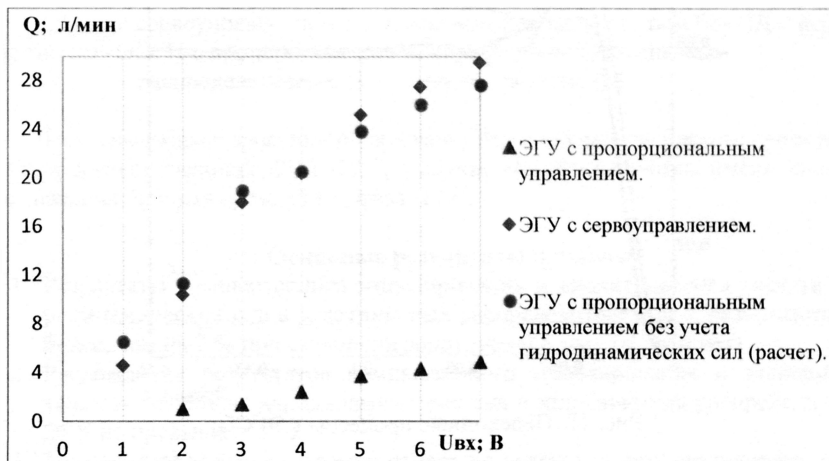


Рис. 17. Статические характеристики ЭГУ

Расход (РЖ) через золотниковый распределитель ЭГУ с пропорциональным управлением в несколько раз меньше, чем у ЭГУ с сервоуправлением. Это объясняется тем, что гидродинамическая сила препятствует смещению золотника. Если гидродинамическую силу значительно уменьшить, спрофилировав соответствующим образом золотник, то расчеты показывают, что расходы обоих типов ЭГУ будут близки друг к другу. Так же была определена зона нечувствительности золот-

ника: ЭГУ с серво управлением – 7 %, ЭГУ с пропорциональным управлением – 17%, ЭГУ с пропорциональным управлением без учета гидродинамической силы, действующей на золотник – 4,4 %, ЭГУ с пропорциональным управлением с гидродинамическим разгруженным (профилированным) золотником – 10 %. Кроме того описан расчет гидродинамических сил, действующих на золотник для экспериментального макета вычисленных с помощью МКЭ и аналитическим методом.

Чтобы приблизить переходный процесс 2 к процессу 1(см рис. 16) в электронный усилитель ЭГСП был введен электронный пропорционально - дифференциальный регулятор, (ПД) с передаточной функцией:

$W_{\text{рег}}(s) = k_n \left(1 + \frac{T_d s}{T_z s + 1} \right)$, в которой $k_n = 0,6 \cdot k_n^{\text{авт}}$; $T_d = 0,125 \cdot T_{\text{авт}}$; $T_z = 0,0001$ с.

Для определения этих параметров регулятора сначала коэффициент усиления ЭГСП увеличиваем до значения, при которых возникают автоколебания, а затем с помощью программы MBTU определены постоянные времени регулятора. Графики переходных процессов показаны на рисунке 18.

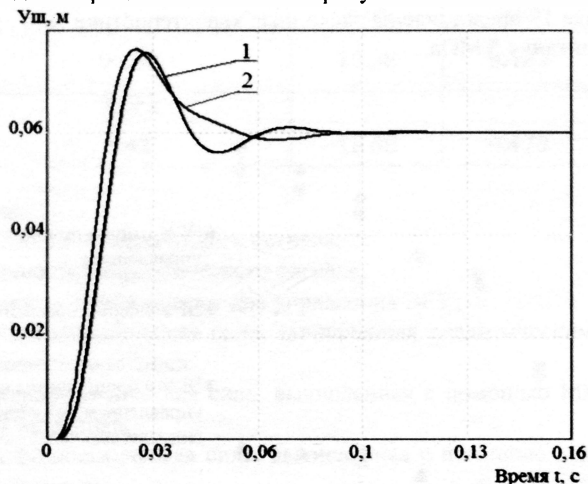


Рис. 18. Переходные процессы в ЭГСП:

1-ЭГУс сервоуправлением золотниковым распределителем без ПД - регулятора

2- ЭГУ с пропорциональным управлением золотниковым распределителем с ПД – регулятором

Кроме того, проведено сравнение частотных характеристик гидроприводов снабженных ЭГУ с сервоуправлением и с пропорциональным управлением золотниковым распределителем (рис.19).

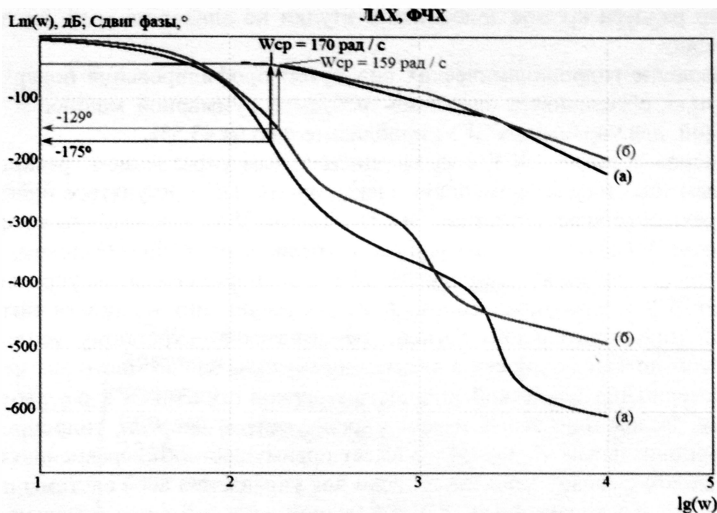


Рис.19. Частотные характеристики:

-ЭГСП с сервоуправлением золотниковым распределителем без ПД - регулятора тип (а) - ЭГСП с пропорциональным управлением золотниковым распределителем с ПД - регулятором тип (б)

Частотные характеристики показывают, что в случае «а» частота среза равна 27 Гц, а соответствующее фаза -175^0 ; в случае «б» эти величины имеют следующие значения: частота среза 25 Гц, фаза -129^0 .

Основные результаты и выводы

1. Результаты компьютерного моделирования и аналитического расчета гидродинамических сил в золотниковых распределителях ЭГУ различаются не более, чем на 2 % при смещении золотника 0,6 мм ($d_3 = 6$ мм).
2. Расхождение результатов компьютерного моделирования и экспериментальных значения гидродинамических сил в золотниковых распределителях ЭГУ не превышает 5 %.
3. Температура РЖ существенно влияет на осевую гидродинамическую силу, действующую на золотник.
4. Профилирование поверхности золотника с подводом жидкости в центре обеспечивает уменьшение гидродинамической силы до значения, равного 43,5% от силы при непрофилированном золотнике.
5. Профилирование поверхности золотника с подводом жидкости по краям обеспечивает уменьшение гидродинамической силы до значения, равного 41,3% от силы при непрофилированном золотнике.
6. Размер зазора между золотником и втулкой мало влияет на гидродинамическую силу.

7. Размер радиуса кромок золотника и втулки не влияет на гидродинамическую силу.
8. Уменьшение гидродинамических сил путем профилирования поверхности золотника обеспечивает снижение требуемой суммарной мощности, необходимой для управления ЭГУ; приблизительно на 43.5%.
9. При использовании ЭГУ с пропорциональным управлением распределительным золотником применение электронного ПД - регулятора приближает переходные характеристики ЭГСП с таким ЭГУ, к переходным характеристикам ЭГСП с сервоуправлением золотниковым распределителем.
10. При использовании в гидроприводе ЭГУ с пропорциональным управлением вместо ЭГУ с сервоуправлением, функции увеличения мощности сигнала в первой (предварительной) ступени передаются электронному усилителю. При этом потери мощности в электронном усилителе во много раз меньше, чем потери гидравлической мощности в первой ступени ЭГУ с сервоуправлением. Вследствие этого, с точки зрения затрат энергии, гидропривод с пропорциональным управлением имеет преимущество по сравнению с гидроприводом с сервоуправлением, если для управления всей системы не требуется высоко динамичный ЭГУ с большой частотой среза и малым изменением фазы.
11. Использование электрической обратной связи по положению золотника позволяет улучшить характеристики ЭГУ с пропорциональным управлением и в том числе, уменьшить зону нечувствительности.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Салман М. И, Попов Д. Н. Компьютерное исследование и расчёт гидродинамических нагрузок на золотник // Наука и образование, М, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. DOI: 10.7463/1112.0491484
2. Салман М. И, Попов Д. Н. Уравновешивание гидродинамических сил путем профилирования поверхности золотника // Наука и образование, М, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. DOI:10.7463/1112.0491497
3. Салман М. И. Сравнение динамических характеристик гидравлических приводов при двух способах управления золотниковым распределителем// Известия вузов. Машиностроение. 2013. № 7. С. 43 - 48.
4. Салман М.И., Сосновский Н.Г. Сравнение статических характеристик электрогидравлических усилителей с пропорциональным и сервоуправлением// Наука и образование, М, МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 7. DOI:10.7463/0713.0579738.