М420376

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ДОБРОВОЛЬСКИЙ Борис Всеволодович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ СЛЕДЯЩЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ДРОССЕЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Специальность 05.02.03 – Системы приводов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 1981 г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель – кандидат технических наук,
доцент БАРАНОВ В.Н.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
ЗАХАРОВ Ю.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
СЫРИЦИН Т.А.
кандидат технических наук
ФОМИЧЕВ В.М.

Ведущее предприятие – указано в решении Совета

Защита д__ 1981г.
в 16 ча... ированн-
ного Совета Н... мы уп-
равления" Мос... револ-
юции и орде... ческо-
го училища и... , Б-5,
2-я Бауманск...
Ваши от... , про-
сим высылать...
С дисс... лища.
Авторе...

УЧЕНЫЙ...
К.Т... ЕВ

М420545

Б- 85876 ... ж 100

1420545
Добровольский Б.В.Исследов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. Следящие гидравлические исполнительные механизмы (СГИМ) дроссельного управления находят широкое применение в различных областях науки и техники, отраслях промышленности. В частности, СГИМ дроссельного управления используются в качестве силового элемента в системах виброзащиты (активные демпферы), системах имитации дорожных условий, устройствах для создания целенаправленных вибраций (вибрационные механизмы). При этом возникает необходимость в проведении исследований динамики СГИМ при подаче на его вход либо гармонического либо ступенчатого входных воздействий. В последнем случае результаты анализа могут быть применены для определения реакции СГИМ на периодический входной сигнал типа импульсов прямоугольной формы (показатели качества переходного процесса характеризуют форму выходного сигнала).

М420545

Заключительным этапом анализа является создание методик расчета и проектирования СГИМ дроссельного управления, которые позволяют обеспечить надежность функционирования, высокую динамическую точность отработки входного сигнала, устойчивость движения его исполнительного органа (ИО). Эти методики должны быть простыми, оперативными, получены с применением строгих математических методов.

В математической модели СГИМ при его исследовании необходимо учитывать наиболее характерный комплекс составляющих сил нагрузки и нелинейности, обусловленные самим характером гидромеханических процессов, протекающих в СГИМ дроссельного управления. Создание методик расчета, удовлетворяющих указанным выше требованиям, является актуальной задачей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ. В работе проведено аналитическое исследование в сочетании с методами математического моделирования на АВМ и ЭЦВМ переходного процесса, устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ при ступенчатом входном воздействии, устойчивости движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии с целью создания инженерных методик расчета и проектирования СГИМ дроссельного управления.

В работе ставились следующие задачи:

I. Оценка показателей качества переходного процесса (време-

МВТУ им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

ни переходного процесса и перерегулирования) без построения графика кривой переходного процесса.

2. Определение области устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ при ступенчатом входном сигнале.

3. Определение условий устойчивости движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии и исследование влияния параметров СГИМ на устойчивость движения.

4. Создание инженерных методик по оценке показателей качества переходного процесса и определению области параметров, в которой положение равновесия ИО СГИМ будет устойчивым.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Использовались различного рода приближенные аналитические методы (метод гармонической линеаризации, метод последовательных приближений, асимптотические методы), обобщения теорем А.М. Ляпунова об устойчивости движения, методы аналогового моделирования на АВМ, численные методы расчета на ЭЦВМ, статистические методы обработки результатов эксперимента.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА. Впервые получены:

1) оперативные оценки показателей качества переходного процесса в СГИМ дроссельного управления без построения графика кривой переходного процесса;

2) условия устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ при ступенчатом входном сигнале, которые по сравнению с известными и полученными также с применением метода гармонической линеаризации, содержат только параметры СГИМ, не являясь трансцендентными выражениями, зависящими от амплитуды и частоты автоколебаний. Это позволяет более просто оценить качественно влияние параметров СГИМ на устойчивость положения равновесия. Показано, что постоянная составляющая сил нагрузки и составляющая сил упругости могут привести к неустойчивости положения равновесия ИО СГИМ, первоначально нагруженного инерционной составляющей сил нагрузки и составляющей сил вязкого трения. В работе получено одно из ряда других условий, которое требует для обеспечения устойчивости наличия у СГИМ неколебательного движения ИО СГИМ. Это движение должно происходить под действием возмущений при отключенном золотниковом распределителе и нагрузке, состоящей из инерционной составляющей сил нагрузки, составляющих сил упругости и сил вязкого трения;

3) математически строгое условие устойчивости движения ИО

нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии. Анализ условия устойчивости подтвердил впервые обнаруженный проф. Д.Н. Поповым факт ухудшения свойства устойчивости при уменьшении амплитуды входного сигнала. В дополнение был обнаружен факт ухудшения свойства устойчивости при уменьшении частоты входного сигнала.

РЕАЛИЗАЦИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. На одном из машиностроительных предприятий внедрена методика оценки показателей качества переходного процесса при колебательном движении качающейся части устройства с учетом влияния на параметры колебаний сжимаемости рабочей жидкости в гидросистеме. Даны рекомендации по изменению параметров колебаний, что позволило не проводить экспериментального исследования на дорогостоящем макете изделия. Это позволило получить предприятию более 80 тысяч руб. экономии.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Разработанная методика оценок показателей качества переходного процесса позволяет оперативно оценить время переходного процесса и перерегулирование, что делает их полезными на начальной стадии расчета и проектирования СГИМ дроссельного управления. Полученные в работе условия устойчивости позволяют определить область параметров СГИМ, в которой положение равновесия и движение ИО СГИМ будут устойчивыми. Это дает свой вклад в обеспечение надежности функционирования вновь проектируемого или используемого в конкретных условиях СГИМ.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. Результаты работы докладывались на XXXУ научной конференции СибАДИ (г.Омск) в 1975 г.; общегородском научно-методическом семинаре по теоретической механике (г.Омск, 1978 г.); XШ и XУ Всесоюзных совещаниях по гидравлической автоматике (г.Калуга, 1974 и 1980 гг.); отдельные части и вся работа докладывались на научно-методических семинарах кафедр КФ-16 МВТУ и К-6 МВТУ им. Н.Э.Баумана, научно-методическом семинаре по прикладной теории колебаний кафедры теоретической механики МВТУ им. Н.Э.Баумана.

ПУБЛИКАЦИИ. По материалам диссертации опубликовано четыре печатные работы.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 92 наименований, приложения. Содержит 7 таблиц, 35 рисунков, 128 страниц машино-

писного текста, в том числе 13 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность исследований динамики переходных режимов и устойчивости движения ИО СГИМ дроссельного управления, недостаточная освещенность некоторых вопросов динамики, кратко формулируется цель и задачи диссертации.

В первой главе дается обзор состояния вопроса и вывод основных дифференциальных уравнений СГИМ дроссельного управления.

При общеизвестных основных допущениях, с привлечением формализованной процедуры вывода [1] из более общей системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику СГИМ, и дополнительных допущений, характерных для вибрационных СГИМ (В.Н. Баранов, Ю.Е. Захаров), основные дифференциальные уравнения СГИМ дроссельного управления представлены следующей системой уравнений

$$\begin{aligned} &K_{сж}\frac{d\Delta P}{dt} + 2K_{п}\Delta P + 2F\frac{dy}{dt} = 2K_{\Delta}\sqrt{1-\frac{\Delta P}{P_0 - P_{сл}}}\,sgn\Delta\ ; \\ &M\frac{d^2y}{dt^2} + h\frac{dy}{dt} + cy + G = F\Delta P;\quad \Delta = x - y, \end{aligned} \tag{1}$$

принятой при исследовании за основу. В уравнениях обозначены: $K_{сж} = \frac{V}{E} = \frac{Fl_0}{E}$ – коэффициент сжимаемости столба рабочей жидкости; F – площадь поршня; l_0 – начальная длина рабочей полости гидроцилинда; E – приведенный модуль объемного сжатия рабочей жидкости; ΔP – перепад давлений на поршне; $K_п$ – коэффициент пропорциональности при определении перетечек по поршню; y – перемещение поршня; $K = K_{\Delta}\sqrt{P_0 - P_{сл}}$ $\left(K_{\Delta} = \mu y \pi d_з \sqrt{\frac{g}{\gamma}}\right)$ – коэффициент усиления по расходу; μ – коэффициент расхода; P_0 – подводимое давление; $P_{сл}$ – давление в сливной магистрали; $d_з$ – диаметр золотника; $g = 9{,}81$ м/с^2; γ – удельный вес рабочей жидкости; M – приведенная к ИО масса подвижных частей; h – коэффициент составляющей сил вязкого трения; c – коэффициент составляющей сил упругости; G – постоянная составляющая сил нагрузки; x – перемещение золотника; Δ – открытие рабочего окна золотника.

При частных допущениях относительно составляющих сил нагрузки, упругих свойств гидродвигателя, утечек, перетечек приводятся различные математические модели гидравлических исполнительных механизмов, сравнительная характеристика методов, используемых для построения переходных функций и исследования устойчи-

вости движения и положения равновесия ИО СГИМ.

Отмечается следующее:

1. Существующие примеры построения переходной функции нелинейного СГИМ с применением приближенных аналитических методов дают результатом сложные выражения и требуют для определения показателей качества переходного процеса построения графика кривой переходного процесса с применением ЭЦВМ.

2. При исследовании устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ в работах изучается либо свободное движение (входной сигнал принимают равным нулю), либо не учитывают реверсирование потока рабочей жидкости (отсутствует $sgn\,\Delta$), влияние постоянной составляющей сил нагрузки ($G = 0$) и составляющей сил упругости ($C = 0$).

3. Широкое распространение при исследовании устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ получил метод гармонической линеаризации ввиду его сравнительной простоты. Однако, окончательные выражения для условий устойчивости являются трансцендентными функциями амплитуды и частоты автоколебаний, что затрудняет качественное исследование влияния параметров СГИМ на устойчивость положения равновесия.

4. При исследовании устойчивости вибрационных СГИМ получены условия устойчивости движения ИО СГИМ, описываемого линеаризованным методом последовательных приближений уравнением движения ИО СГИМ (В.Н. Баранов, Ю.Е. Захаров). В работах указанных авторов не проведен анализ влияния параметров СГИМ и входного сигнала на устойчивость движения ИО СГИМ и отсутствуют условия, гарантирующие устойчивость движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии.

Во второй главе рассматривались вопросы оценки показателей качества переходного процесса СГИМ дроссельного управления без построения графика кривой переходного процесса. Основные уравнения СГИМ дроссельного управления записаны в безразмерном виде относительно сигнала ошибки σ введением переменных по формулам:

$$\tau = \frac{t}{T}; \quad z = \frac{y}{x_0}; \quad \sigma = 1 - z;$$

$$a_0\dddot{\sigma} + a_1\ddot{\sigma} + (1+a_2)\dot{\sigma} + a_3\sigma = a_3 + a_4 - \sigma\sqrt{1+\varepsilon(\ddot{\sigma}+\zeta\dot{\sigma}+\lambda^2\sigma-\lambda^2-q)\,sgn\,\dot{\sigma}}, \qquad (2)$$

где: x_0 – величина ступенчатого входного воздействия; T – постоянная времени идеального гидродвигателя; ε – малый параметр.

Исследование опиралось на линеаризованное методом последовательных приближений уравнение движения ИО СГИМ 2

$$a_0\dddot{v} + (a_1 + 0{,}5\varepsilon e^{-\tau})\ddot{v} + (1 + a_2 + \varepsilon)\dot{v} + (1 + a_3 + 0{,}5\varepsilon\lambda^2 e^{-\tau})v = a_3 + a_4 + 0{,}5\varepsilon(\lambda^2 + q)e^{-\tau} \qquad (3)$$

и способом В.А. Хохлова уравнение движения (следует из (3) при $\varepsilon = 0$). Решение последнего при начальных условиях $v(0) = 1$, $\dot{v}(0) = \ddot{v}(0) = 0$ получено общеизвестными способами. Из его решения следуют оценки времени переходного процесса для случаев:

а) корни характеристического уравнения вещественные

$$\tau_{pn+1} \leqslant \frac{1}{\alpha_к} \ln \frac{|A_1| e^{-(\alpha_1 - \alpha_к)\tau_{pn}} + |A_2| e^{-(\alpha_2 - \alpha_к)\tau_{pn}} + |A_3| e^{-(\alpha_3 - \alpha_к)\tau_{pn}}}{0{,}05}, \qquad (4)$$

где: A_i – постоянные интегрирования; $\alpha_к$ – наименьший по модулю корень характеристического уравнения. Для оценки применяется метод последовательных приближений (за нулевое приближение можно принять $\tau_{p0} = 0$);

б) корни характеристического уравнения комплексно сопряженные, один вещественный. Алгоритм оценки времени переходного процесса следующий:

при $\alpha_1 > \gamma$:
$$\tau_{pn+1} \leqslant \ln \frac{Ae^{-(\alpha_1 - \gamma)\tau_{pn}} + D}{0{,}05}; \qquad (5)$$

при $\alpha_1 < \gamma$:
$$\tau_{pn+1} \leqslant \ln \frac{A + De^{-(\gamma - \alpha_1)\tau_{pn}}}{0{,}05}, \qquad (6)$$

где A , D – постоянные интегрирования решения

$$v = Ae^{-\alpha_1 \tau} + \Gamma e^{-\gamma\tau} \sin(\omega\tau + \varphi). \qquad (7)$$

Перерегулирование оценивается по формуле

$$\sigma\% \leqslant |v_{min}| \cdot 100\% = |Ae^{-\alpha_1 \tau_{min}} - De^{-\gamma\tau_{min}}| \cdot 100\%, \qquad (8)$$

где $\tau_{min} = \frac{1}{\gamma - \alpha_1} \ln \frac{\alpha_1 A}{\gamma D}$ – время, соответствующее минимуму миноранты решения (7).

В работе указаны условия, при выполнении которых оценки времени переходного процесса и перерегулирования будут оценками сверху по отношению к нелинейному СГИМ (именно такие оценки имеют смысл для приложений). Последнее, кроме того, было подтверждено данными аналогового моделирования исходной нелинейной системы, линеаризованной методом последовательных приближений и способом В.А. Хохлова. По отношению к линеаризованной способом В.А. Хохлова математической модели СГИМ погрешность оценок не превышает 13% при оценке времени переходного процесса и 12% при оценке перерегулирования. Сравнение предложенных оце-

нок показателей качества и оценок с применением косвенных критериев качества (колебательности и степени устойчивости) показало, что погрешность последних выше в 1,3 раза при оценке времени регулирования и более чем в 2,5 раза выше при оценке перерегулирования. Погрешность оценок по отношению к нелинейному СГИМ растет при увеличении безразмерного параметра ε. Рекомендовано использовать предложенные оценки показателей качества переходного процесса нелинейного СГИМ при $\varepsilon \leq 0{,}3$-$0{,}4$ для оценки времени переходного процесса и при $\varepsilon \leq 0{,}2$-$0{,}3$ при оценке перерегулирования. Сравнительно большая погрешность (35-40% пр. предельных значениях указанного диапазона ε) окупается простотой и оперативностью этих оценок. Наибольшую пользу они могут принести на начальной стадии расчета и проектирования СГИМ дроссельного управления. Для построения переходной функции нелинейного СГИМ составлена программа вычислений на ЭЦВМ "Наири-К" с использованием на участках знакопостоянства функции $sgn\,\Delta$ стандартной подпрограммы решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта четвертого порядка.

В третьей главе проведено исследование устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ при ступенчатом входном воздействии и движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии. Условия устойчивости получены с учетом влияния на устойчивость сжимаемости рабочей жидкости, перетечек, нелинейности расходно-перепадной характеристики, реверсивности потока рабочей жидкости, инерционной и постоянной составляющих сил нагрузки, составляющих сил вязкого трения и сил упругости.

Первый параграф главы посвящен исследованию устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ при ступенчатом входном воздействии. С использованием разложенного по степеням малого параметра ε уравнения движения в форме (2) составлено с точностью до ε^2 уравнение возмущенного движения - нелинейное, с недифференцируемой правой частью. Исследование устойчивости по первому приближению на основе теорем А.М.Ляпунова не может быть проведено. Для решения задачи применен метод гармонической линеаризации ввиду его простоты по сравнению с методами абсолютной устойчивости и вторым методом А.М.Ляпунова.

Коэффициенты линеаризованного уравнения получились в виде сложных трансцендентных функций амплитуды и частоты автоколеба-

ний. Определение области устойчивости производят в этом случае с применением численных методов расчета на ЭЦВМ и графических методов. Разложением трансцендентных функций в ряды по переменной, которая по своему смыслу меньше единицы, отбрасывая члены выше второго порядка малости, удалось упростить коэффициенты линеаризованного уравнения возмущенного движения (погрешность аппроксимации не превысила 16,6%). После упрощения коэффициентов гармонической линеаризации, уравнение возмущенного движения записано в виде

$$a_0\delta\ddot{v} + (a_1 + \frac{4\varepsilon A}{3\pi})\delta\dot{v}_1 + \left\{1 + a_2 + \varepsilon\frac{2\gamma}{3\pi}\left[3\left(\frac{v^* + \delta_0}{A}\right)^2 + 2\right]\right\}\delta v_1 +$$
$$+\left\{1 + a_3 + \frac{2\varepsilon}{3\pi A}\left[3\lambda^2(v^* + \delta_0)^2 - 3(\lambda^2 + q)(v^* + \delta_0) + 4\lambda^2 \cdot A^2\right]\right\}\delta v_1 = \quad (9)$$
$$= -\frac{\varepsilon}{2}\left\{(\lambda^2 + q)v^* + \frac{2A}{\pi}[2\lambda^2(v^* + \delta_0) - \omega^2(v^* + \delta_0) - (\lambda^2 + q)]\right\} - (1 + a_3)\delta_0,$$

где: δv - отклонение ИО СГИМ в возмущенном движении; A, ω - амплитуда и частота автоколебаний; δ_0 - постоянная составляющая периодического решения $\delta v = \delta v_1 + \delta_0$ $(\delta v_1 = A\sin\omega\tau)$; v^* - установившееся значение ошибки [2].

Наложением ограничения на возмущения (достаточная малость), мерой которых при исследовании устойчивости служит амплитуда автоколебаний (Е.П. Попов), определены условия положительности коэффициентов уравнения (9) и предпоследнего определителя Гурвица для его коэффициентов. Условия устойчивости с точностью до ε^2 и A^2 получены в виде системы неравенств вида:

$$a_1(1 + a_2) - a_0(1 + a_3) > 0; \qquad 1 + a_2 + \gamma a_1 - 2a_0\lambda^2 > 0;$$
$$1 + a_3 - \varepsilon(\lambda^2 + q) > 0; \qquad \gamma a_1 - a_0\lambda^2 > 0. \quad (10)$$

Для выявления влияния параметров СГИМ на устойчивость положения равновесия, условия устойчивости (10) выражены через коэффициенты основных дифференциальных уравнений СГИМ в следующей безразмерной форме:

$$\gamma\frac{d\rho}{d\tau} + \zeta\rho + \frac{dz}{d\tau} = (1 - z)\sqrt{1 - \rho\sin(1 - z)};$$
$$\varepsilon\frac{d^2z}{d\tau^2} + 2N\frac{dz}{d\tau} + \Lambda z + \alpha = \rho, \quad (11)$$

где: γ - безразмерный коэффициент упругости гидродвигателя; ζ - безразмерный коэффициент герметичности, характеризующий перетечки рабочей жидкости между полостями гидроцилиндра; ρ - без-

размерный перепад давления; ε – безразмерный коэффициент инерционной составляющей сил нагрузки; $2N$ – безразмерный коэффициент составляющей сил вязкого трения; Λ – безразмерный коэффициент составляющей сил упругости; α – безразмерная величина постоянной составляющей сил нагрузки. В новых переменных условия устойчивости приобрели вид:

$$(2N\eta+\xi\varepsilon)(1+\Lambda\eta+2N\xi)>\varepsilon\eta(1+\Lambda\xi);\quad N\left(\frac{2N\eta}{\varepsilon}+3\xi\right)+1>\eta\Lambda;$$
$$1+\Lambda\xi>(\Lambda+\alpha);\qquad N(2N+\xi\varepsilon)>\varepsilon\eta\Lambda. \tag{12}$$

Из рассмотрения условий устойчивости следует, что увеличение постоянной составляющей сил нагрузки и коэффициента составляющей сил упругости ведет к увеличению правых частей неравенств и, следовательно, ухудшает свойство устойчивости. Увеличение коэффициента составляющей сил вязкого трения улучшает свойство устойчивости. Влияние остальных параметров неоднозначно. В связи с этим следует обратить внимание на коэффициент герметичности, так как существует широко распространенное утверждение о том, что увеличение перетечек по поршню всегда способствует улучшению свойства устойчивости.

В случае отсутствия перетечек и постоянной составляющей сил нагрузки (случай распространен на практике), условия устойчивости получились следующими:

$$2N(1+\Lambda\eta)>\varepsilon;\quad \frac{2N^2\eta}{\varepsilon}+1>\eta\Lambda;\quad \Lambda<1;\quad 2N^2>\varepsilon\Lambda. \tag{13}$$

Третье условие удовлетворяется, так как $\Lambda=\frac{cx_0}{F(p_0-p_{сл})}$ – отношение составляющей сил упругости в статике к максимальной движущей силе. Введением новых переменных $m=\frac{\varepsilon}{\eta}$, $s=\Lambda\eta$ показано, что при выполнении последнего условия, второе из условий также выполняется и условия устойчивости становятся особенно простыми

$$N>0{,}5\varepsilon/1+s;\qquad N>0{,}707\sqrt{ms}. \tag{14}$$

В размерных переменных

$$h>\frac{2M\cdot K_1F\sqrt{p_0-p_{сл}}}{2F^2+ck_{сж}};\qquad h>1{,}41\sqrt{Mc}. \tag{15}$$

Первое условие получено (из других предпосылок) впервые В.А. Хохловым с применением линеаризации путем пренебрежения перепадом давления по сравнению с подводимым давлением в уравнении расходно-перепадной характеристики. Второе условие тре-

бует для обеспечения устойчивости неколебательного движения механической системы, состоящей из приведенной к поршню массы и упругого элемента, т.е. СГИМ при отключенном золотниковом распределителе. По-другому - демпфирование этой системы должно быть таковым, чтобы переходной процесс при свободном движении ее был апериодическим.

В работе построена диаграмма параметрического семейства границ устойчивости в координатах N и S. Параметрами служили безразмерные величины ε и m. На диаграмму наносились точки, соответствующие вхождению СГИМ в автоколебательный режим при экспериментальном исследовании устойчивости положения равновесия ИО СГИМ. Сравнение положения точек границ устойчивости, определенных экспериментальным путем, и точек, положение которых определялось согласно условиям устойчивости, показало, что условия устойчивости обеспечивают запас устойчивости, лежащий в пределах 1,5-2 раза.

В работе разработана методика определения области параметров СГИМ (массы нагрузки, жесткости упругого элемента, подводимого давления), в которой положение равновесия ИО СГИМ будет устойчивым.

Второй параграф главы посвящен исследованию устойчивости движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии.

Основные дифференциальные уравнения приведены к безразмерному виду введением переменных $z=\frac{q}{I_0}$; $\tau=\omega t$, где I_0 , ω - амплитуда и частота входного сигнала. Исследование опиралось на две формы записи основных дифференциальных уравнений СГИМ дроссельного управления:

$$\rho\dot{\rho}+\xi\rho+H\dot{z}=(\sin\tau-z)\sqrt{1-\rho\,\mathrm{sgn}(\sin\tau-z)}\,; \qquad (16)$$

$$\varepsilon\ddot{z}+2N\dot{z}+\Lambda z+\alpha=\rho\,;$$

$$a_0\dddot{z}+a_1\ddot{z}+a_2\dot{z}+a_3 z+a_4=(\sin\tau-z)\times$$

$$\times\sqrt{1-(\varepsilon\ddot{z}+2N\dot{z}+\Lambda z+\alpha)\,\mathrm{sgn}(\sin\tau-z)}\,. \qquad (17)$$

Смысл введенных коэффициентов аналогичен изложенному выше. Все коэффициенты (16), за исключением конструктивного коэффициента H, малые единицы.

При $\rho<0{,}67$ с погрешностью, не превышающей 15,6%, уравнение движения ИО СГИМ будет иметь вид:

$$a_0\ddot{z} + a_1\ddot{z} + a_2\dot{z} + a_3 z + a_4 = (\sin\tau - z) -$$
$$- 0{,}5(\varepsilon\ddot{z} + 2N\dot{z} + \Lambda z + \alpha)|\sin\tau - z|. \qquad (18)$$

Путем замены переменной $z = z^* + \delta$ (z^* - реакция СГИМ на гармоническое входное воздействие; δ - отклонение ИО СГИМ в возмущенном движении) получено уравнение возмущенного движения - нелинейное, нестационарное. Периодические коэффициенты и правая часть представляют собой недифференцируемые функции.

Исследование устойчивости движения представляет в этом случае сложную задачу.

Уравнение возмущенного движения приведено к нормальной форме Коши

$$\dot{x} = \|A + \Phi(\tau)\| x + f(x,\tau), \qquad (19)$$

где: A - матрица коэффициентов линейной стационарной части уравнения возмущенного движения; $\Phi(\tau)$ - периодическая матрица; $f(x,\tau)$ - вектор-столбец, принятый при исследовании за возмущение.

С применением теорем И.Г.Малкина об устойчивости по первому приближению нелинейных уравнений с периодическими коэффициентами и Дж.Хейла о мультипликаторах (корнях характеристического уравнения) линейных систем с периодическими коэффициентами доказано, что при малой нагрузке (малы ε, $2N$, Λ, α) влиянием на устойчивость возмущения $f(x,\tau)$ можно пренебречь, если асимптотически устойчиво решение $x = 0$ системы уравнений вида:

$$\dot{x} = \|A + \Phi(\tau)\| x \qquad (20)$$

Затем периодическая матрица $\Phi(\tau)$ была разложена в ряд Фурье и доказано с применением обобщения теоремы А.М.Ляпунова об устойчивости линейных систем с переменными коэффициентами, произведенным Л.Чезари, что осциллирующими членами матрицы с периодическими коэффициентами $\Phi(\tau) = \Phi_0 + \Phi_1(\tau)$ (Φ_0 - постоянная составляющая разложения в ряд Фурье; $\Phi_1(\tau)$ - осциллирующая часть разложения в ряд Фурье матрицы $\Phi(\tau)$) можно пренебречь, если асимптотически устойчиво решение $x = 0$ системы уравнений

$$\dot{x} = \|A + \Phi_0\| x \qquad (21)$$

и малы ε, $2N$, Λ. Асимптотическая устойчивость последнего гарантируется условием

$$\left(a_1 + \frac{\varepsilon b_2}{2}\right)(a_2 + N b_2) - \left(1 + a_3 + \frac{\Lambda b_2}{2}\right)a_0 > 0, \qquad (22)$$

являющимся неравенством Гурвица для коэффициентов характеристического уравнения матрицы $\|A+\Phi_0\|$, а также, как результат вышеизложенного, условием устойчивости движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии. В неравенстве (22) b_0 - постоянная составляющая разложения в ряд Фурье функции $|\sin\tau - z^*|$.

В работе с применением леммы, доказанной Е.А.Барбашиным, показано, что условие устойчивости, полученное Ю.Е.Захаровым и В.Н.Барановым с использованием линеаризации методом последовательных приближений уравнения движения ИО СГИМ, справедливы на конечном интервале времени, который тем больше, чем меньше нагрузка на ИО СГИМ, выше герметичность и жесткость гидродвигателя с учетом сжимаемости рабочей жидкости.

Условие устойчивости (22), выраженное через коэффициенты системы уравнений (16), оказалось сложным для анализа влияния параметров СГИМ на устойчивость движения. Учитывая, что N, η, ξ, ε Λ меньше единицы и заменив z^* - точное решение уравнения движения ИО СГИМ приближенным (определена реакция идеального ($\rho \equiv 0$) СГИМ на гармоническое входное воздействие), получено с точностью до членов третьего порядка малости условие устойчивости движения ИО СГИМ дроссельного управления при гармоническом входном воздействии:

$$2N\eta + \xi\varepsilon + \frac{\varepsilon b_0}{2} > \frac{\varepsilon\eta}{H} \qquad (23)$$

В размерных переменных:

$$M < \frac{K_{сж} h F}{\omega_{сж} K_f \sqrt{P_0 - P_{сл}} - 2F\left[K_n + \dfrac{F\omega x_0 K_f}{\pi\sqrt{P_0 - P_c}\sqrt{F^2\omega^2 + K_f^2 (P_0 - P_{сл})}}\right]} \qquad (24)$$

В знаменателе второе слагаемое в квадратных скобках характеризует влияние нелинейности расходно-перепадной характеристики и параметров входного сигнала на устойчивость движения ИО СГИМ.

С применением ЭЦВМ "Наири-К", варьируя подводимое давление, перетечки, амплитуду и частоту входного сигнала f, построены параметрические семейства границ устойчивости в координатах: M, f; M, x_0.

Из анализа условия устойчивости и построения параметрических семейств границ устойчивости следует:

I) при определенном соотношении параметров СГИМ

$$K_{ск} K_f \sqrt{P_0 - P_{сл}} - 2F\left[K_n \frac{FK_f \omega x_0}{\pi \sqrt{P_0 - P_{сл}} \sqrt{F^2\omega^2 + K_f^2 (P_0 - P_{сл})}}\right] \leq 0 \qquad (25)$$

движение ИО СГИМ будет устойчивым при любой приведенной массе;

2) увеличение амплитуды и частоты входного сигнала приводит к увеличению области устойчивости движения ИО СГИМ. Последний факт приобретает особое значение для вибрационных СГИМ, так как исследуемый выше режим работы является для них основным.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального исследования устойчивости положения равновесия ИО СГИМ с целью выяснения того запаса устойчивости, который доставляют условия устойчивости положения равновесия, полученные при аналитическом исследовании.

Экспериментальное исследование проводилось на установке, созданной на кафедре "Автоматические установки" Омского политехнического института и при ее поддержке. В связи с этим хочется выразить глубокую признательность и благодарность д.т.н., проф. С.И. Барсукову и его сотрудникам за то внимание и бескорыстную помощь, которую они оказали при создании установки и проведении экспериментальных работ.

Экспериментальная установка представляет собой физическую модель СГИМ дроссельного управления, принципиальная схема которой показана на рис. I.

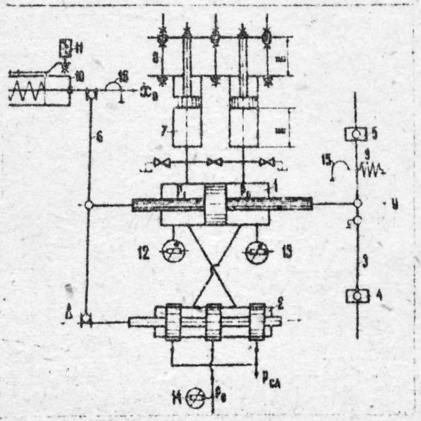


Рис. I

Особенностью установки является наличие неединичной обратной связи (ОС) (реализована посредством рычага ОС 6; коэффициент усиления равен двум) и механизма изменения объемов 8 дополнительных полостей 7, соединенных с полостями гидроцилиндра и позволяющих управлять упругими свойствами гидродвигателя. Это дает возможность получить большее число точек факторного пространства эксперимента с автоколебательным движением ИО СГИМ с единичной ОС и при допустимом для установки подводимом давлении.

При создании установки были приняты меры к удовлетворению тех предположений и допущений, которые принимались при выводе основных дифференциальных уравнений СГИМ.

Приведенная масса подвижных частей, присоединенных к штоку поршня, и коэффициент вязкого трения определялись путем экспериментального изучения динамики колебательного движения механической системы, состоящей из подвижных частей и упругого элемента при ударном воздействии на нее и отключенном золотниковом распределителе СГИМ.

Приведенная жесткость гидродвигателя с учетом сжимаемости рабочей жидкости (масло АМГ-10, ГОСТ 6794-75) определялась путем исследования переходных процессов по давлению в полостях гидроцилиндра при заторможенном штоке поршня СГИМ. На основе экспериментальных данных получено уравнение регрессии в виде линейной зависимости $K_{сж}$ коэффициента сжатия от хода H поршней дополнительных полостей. Установлена степень существования линейной зависимости $K_{сж}$ от H (выборочный коэффициент корреляции $r = 0,87$).

В ходе эксперимента варьируемыми факторами служили величины подводимого давления, ступенчатого входного сигнала, хода поршней дополнительных полостей, жесткости упругого элемента.

Результатом эксперимента явились 12 точек факторного пространства эксперимента с автоколебательным движением ИО СГИМ. Эти точки определили положение точек границы устойчивости положения равновесия ИО СГИМ. Сравнение положения этих точек на диаграмме параметрического семейства границ устойчивости, построенной согласно условиям устойчивости, показало, как указывалось выше, что условия устойчивости обеспечивают запас устойчивости в пределах 1,5-2 раза.

В заключении сформулированы основные результаты выполненной

работы:

I. Полученные оценки показателей качества переходного процесса (времени переходного процесса и перерегулирования) нелинейного СГИМ по линеаризованной модели являются оценками сверху. Они позволяют определить показатели качества без построения графика кривой переходного процесса, являются оперативными, что делает их полезными на начальной стадии проектирования СГИМ дроссельного управления.

2. Методическая погрешность оценок по отношению к нелинейной модели СГИМ растет с увеличением безразмерного параметра ε. Рекомендуется использовать предложенные оценки при $\varepsilon \leq$ 0,3-0,4 при оценке времени переходного процесса и при $\varepsilon \leq$ 0,2-0,25 при оценке перерегулирования.

3. Оценки показателей качества могут быть использованы при расчете линейных систем регулирования, описываемых системой дифференциальных уравнений третьего порядка. При этом погрешность оценок не превышает 13% при оценке времени переходного процесса и 10,2% при оценке перерегулирования. Сравнение предложенных оценок и оценок с применением косвенных критериев качества показало, что точность их в 2,5-5 раз выше при оценке перерегулирования и в 1,3 раза выше при оценке времени переходного процесса.

4. Полученные достаточные условия устойчивости положения равновесия ИО нелинейного СГИМ при ступенчатом входном воздействии обеспечивают запас устойчивости в пределах 1,5-2 раза. Они не имеют в своем составе величины ступенчатого входного воздействия, т.е. являются по отношению к возмущениям его величины условиями устойчивости в целом. Окончательные математические выражения для условий устойчивости содержат только параметры СГИМ, не являясь трансцендентными функциями частоты и амплитуды автоколебаний.

5. Показано, что постоянная составляющая сил нагрузки и составляющая сил упругости могут привести к неустойчивости положения равновесия ИО СГИМ нагруженного первоначально инерционной составляющей сил нагрузки.

6. Для частного случая (отсутствуют перетечки рабочей жидкости и постоянная составляющая сил нагрузки) разработана методика определения области устойчивости положения равновесия ИО

СГИМ, позволяющая осуществить выбор массы, жесткости упругого элемента, величины подводимого давления для обеспечения устойчивой работы СГИМ дроссельного управления.

7. Полученные математически строго условия устойчивости движения ИО нелинейного СГИМ при гармоническом входном воздействии являются достаточными и гарантируют устойчивость в малом. В условия устойчивости входят параметры входного сигнала (амплитуда и частота), что является следствием влияния на устойчивость движения ИО нелинейности расходно-перепадной характеристики.

8. Анализ условий устойчивости показал, что увеличение амплитуды и частоты входного сигнала приводит к увеличению области устойчивости движения ИО СГИМ. Этот факт приобретает особое значение для вибрационных СГИМ, так как указанный выше режим работы является для них основным.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Баранов В.Н., Добровольский Б.В., Захаров Ю.Е. О влиянии газовой составляющей в рабочей жидкости на динамику гидравлического поршневого исполнительного механизма. - В кн.: XIII Всесоюзное совещание по гидравлической автоматике: Материалы к совещанию. - Калуга: Институт проблем управления, 1974, с. 204-210.

2. Захаров Ю.Е., Баранов В.Н., Добровольский Б.В. Способ построения переходной функции гидравлического следящего привода дроссельного регулирования. - В кн.: Вопросы надежности гидравлических систем летательных аппаратов: Межвузовский сборник научных трудов. - К.:КИИГА, 1976, вып. 3, с. 58-66..

3. Баранов В.Н., Добровольский Б.В., Захаров Ю.Е. Об устойчивости следящего гидравлического исполнительного механизма. - Известия ВУЗ, Машиностроение, 1976, № 11, с. 68-71.

4. Баранов В.Н., Добровольский Б.В., Захаров Ю.Е. Устойчивость вынужденных колебаний следящего гидравлического исполнительного механизма. - Известия ВУЗ, Машиностроение, 1976, № 10, с. 83-86.

Добр-

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА