

1560692

Московский Государственный Технический Университет
имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи



СКОБЕЛЕВ Михаил Михайлович

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ
МНОГОКАНАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИЛОВЫХ ПРИВОДОВ

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 - 1998

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент
Чельшев В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ермаков С.А.

кандидат технических наук, с.н.с.
Зайченко И.И.

Ведущая организация - Научно-производственное акционерное
общество открытого типа "Родина".

Защита диссертации состоится "23" ноября 1998 г. в 14 ч.
на заседании Диссертационного Совета К.053.15.06 "Машиностроение"
в Московском Государственном Техническом Университете имени
Н.Э.Баумана по адресу: 107005 г.Москва, 2-я Бауманская ул., д.5

к, заверенные печатью, просьба

иться в библиотеке МГТУ имени

бря 1998 г.

1560692

Максимов

Максимов А.И.

апринт МГТУ им. Н.Э.Баумана

12.10.1998 г. Звезда N 118



1560692

Скобелев М.М. Системы авт.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

проблемы. Во многих видах высоконадежных исполнительных систем транспортных средств и технологического оборудования широко используются построенные по принципу общего резервирования многоканальные электрогидравлические силовые приводы (МЭГСП). Из-за принципа построения эти приводы часто называют резервированными. МЭГСП наиболее распространены в авиационных системах дистанционного управления и особенно в так называемых активных системах управления (СУ) статически неустойчивых самолетов.

Современный типовой МЭГСП с жестким безредукторным соединением каналов с суммированием усилий имеет серьезный недостаток - существенное силовое взаимонагружение каналов из-за несинхронности их процессов, вследствие чего происходят значительное уменьшение надежности, срока службы привода, и потеря точности в типичных для активных СУ режимах малых перемещений общей нагрузки.

Известные способы и системы уменьшения взаимонагружения каналов (СУВК) во многом определяются методом резервирования. Чаще используют метод обнаружения и устранения неисправности в двух видах: отключения (вариант активного, т.е. нагруженного, резерва) и замещения (варианты "горячего", т.е. облегченного, и ранее применявшегося "холодного", т.е. выключенного, резервов).

До сих пор по назначению выделяли три основных класса авиационных приводов: МЭГСП, высокоточные и быстродействующие. Жесткие требования активных СУ делают актуальной разработку систем повышенной точности МЭГСП, что соответствует комбинированному классу высокоточных МЭГСП. При этом надо удовлетворительно решить двухкритериальную проблему существенного уменьшения взаимонагружения каналов и значительного увеличения точности малых движений нагрузки. Для эффективного применения МЭГСП, также как и любых электрогидравлических приводов (ЭГП), актуальной задачей является совершенствование их систем автоматического регулирования (САР).

Цель и задачи исследования.

Цель - разработка методов проектирования САР, позволяющих одновременно повысить долговечность и точность МЭГСП.

Для этой цели поставлены и решены следующие основные задачи:

1. Разработка обобщенных математических моделей разной сложности для описания процессов в неизменяемой части МЭГСП.
2. Создание схемы обобщенной многоконтурной САР (МСАР) МЭГСП.
3. Разработка средств коррекции для режимов малых движений.

МГТУ
им. Н.Э.Баумана
ЖС-СТЕНА

1560692

4. Создание прикладной методики многовариантного исследовательского проектирования МСАР МЭГСП, состоящей из двух частей:

- методики анализа взаимонагружения каналов привода;
- методики параметрического синтеза многоконтурных систем.

5. Экспериментальные исследования МСАР типового МЭГСП для проверки созданной методики.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись методы классической теории автоматического регулирования: гармонической линеаризации, гармонического анализа и логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ). Использовались также методы: непрерывного прототипа цифровых САР, параметрической идентификации, поиска оптимального решения покоординатным спуском, информационного поиска. Проверка теоретических результатов выполнялась методами имитационного математического моделирования на ЭЦМ, а также в ходе натурных экспериментов на специально созданном информационно-управляющем вычислительном комплексе с МЭГСП.

Научная новизна. Проведенные в работе исследования позволили получить следующие новые научно-технические результаты:

1. Разработана и исследована система составленных в классической форме "вход-выход", обобщенных моделей процессов в МЭГСП.

2. Разработана схема обобщенной МСАР привода, включающая все известные частные варианты резервирования каналов МЭГСП.

3. Получены и проанализированы блочные передаточные функции (ПФ) каналов МЭГСП в общем матричном и частном скалярном видах.

4. Предложен и исследован псевдолинейный высокоточный способ автоматического регулирования астатического объекта (по патенту РФ N 2103714) на базе и в сравнении с семейством нелинейных корректирующих устройств (НКУ) (по патенту РФ N 2012029).

5. Для микропроцессорных алгоритмов псевдолинейных регуляторов исследованы (без и с совместным учетом двух основных цифровых эффектов) особенности численного дифференцирования со сглаживанием по методу наименьших квадратов (МНК). Предложены численный интегральный и аналитический критерии качества дифференцирования. Получены рекуррентные формулы, алгоритмы и программа дифференцирования с возможностью подстройки порядка сглаживаемого полинома для повышения качества дифференцирования сигналов в реальном времени процессов САР. Уточнена методика расчета основных параметров цифровой САР с учетом свойств рассмотренных алгоритмов.

6. Разработана прикладная методика многовариантного исследовательского проектирования МСАР МЭГСП. Она проверена в экспери-

ментальных исследованиях систем типового привода. Для анализа взаимонагружения каналов предложен и обоснован простой по физическому смыслу, скалярный критерий взаимонагружения любого числа каналов - так называемый коэффициент взаимонагружения.

7. Правильность теоретических положений диссертационной работы подтверждена результатами экспериментальных исследований в процессе проектирования МСАР опытного образца типового МЭГСП. В лучшем варианте МСАР при отработке гармонического сигнала с амплитудой 1 % от максимально возможной и с частотой в 4 раза меньше частоты среза взаимонагружение уменьшено от 15 до 60 раз в зависимости от параметров неизменяемой части каналов, точность увеличена в 4 раза, что удовлетворило технические требования к системе.

Практическая ценность. Созданная прикладная методика позволяет повысить качество проектирования систем МЭГСП. Разработанная методика допускает широкое применение предложенных псевдолинейных регуляторов, рекуррентных формул и алгоритма численного дифференцирования в различных СУ.

Внедрение работы. Материалы диссертации внедрены в НПООТ "Родина" при создании цифровой системы управления МЭГСП РА82 и НИИСМ МГТУ им. Н.Э.Баумана при создании приводных систем манипуляторов и информационно-управляющего вычислительного комплекса для тестирования ЭГП и отладки их систем управления.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на I и II Международных научно-технических конференциях "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (г.Москва, 1992, 1994 гг.), на V Всесоюзном совещании по робототехническим системам (г.Киев, 1987 г.), на V Всесоюзной школе-семинаре молодых ученых и специалистов (г.Нарва, 1986 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 работ, из них 2 патента, 1 авторское свидетельство, 1 статья в журнале.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Работа изложена на 300 страницах, из них 134 страницы машинописного текста. Работа содержит 53 рисунка и 19 таблиц, 17 страниц списка литературы из 165 наименований, 68 страниц приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, приведено краткое содержание диссертации.

Первая глава содержит результаты информационного поиска и анализа существующих исследований по тематике работы. Наиболее известными являются работы, выполненные Ермаковым С.А., Белевитиным В.В., Фомичевым В.М. по исследованиям и проектированию резервированных ЭГП, их базовых систем и элементов, в частности, прецизионных электрогидравлических усилителей (ЭГУ) мощности, аналоговых (гидромеханических и электронных) средств коррекции характеристик приводов, их САР (традиционных и модальных регуляторов, инвариантных систем) и СУ резервированием каналов (систем контроля с электронным модельным каналом и систем переключений каналов привода в отказных ситуациях и экстремальных режимах работы).

В основном исследовались вопросы силового взаимодействия активных каналов, статических характеристик МЭГСП, расчета аналоговых корректирующих устройств (КУ). В исследованиях динамических процессов чаще использовался экспериментальный метод. Вопросы общих теоретических исследований МЭГСП с электронным и цифровым управлением представлены недостаточно. Также рассматривались и использовались только линейные средства электронной коррекции, что не обеспечивало высокие точностные и динамические характеристики САР многоканальных приводов в режимах малых движений.

Рассмотрены существующие математические модели процессов в ЭГП дроссельного регулирования (ЭГПДР) и особенности моделей МЭГСП, способы СУБК, средства коррекции для режимов малых движений нагрузки ЭГПДР и особенности их микропроцессорной реализации, а также проанализированы основные методики параметрического анализа и синтеза МСАР ЭГПДР и регуляторов с НКУ, известные методы и средства экспериментальных исследований САР.

На основании проведенного анализа показана необходимость решения научно-технических задач, поставленных в диссертации.

Во второй главе проведен теоретический анализ процессов в неизменяемой части МЭГСП. Разработаны подробная математическая модель для имитационного моделирования и на ее основе две упрощенные модели для аналитических исследований. Как показали исследования, анализ силового взаимонагружения каналов МЭГСП требует описания процессов в каждой полости гидродвигателей (ГД) каналов. В модели использован модульный принцип построения (модулем является канал МЭГСП как отдельный ЭГПДР). Типовая схема канала включает гидроцилиндр (ГЦ) и ЭГУ с золотниковым гидроусилителем (ЗГУ). Модели полностью нормированы с переходом от конструктивных к динамическим параметрам, традиционно используемым в ТАР.

Для краткости приняты обозначения ПФ типовых звеньев из ТАР: $W1 = K \cdot (1+Ts)$; $W12 = K \cdot (1+T1s) \cdot (1+T2s)$; $W2 = K \cdot (1+2\zeta Ts + T^2 s^2)$. Также обозначены: у сигналов и параметров каналов первый нижний числовой индекс - номер полости ГД (1;2); второй - номер канала ($i=1...n$); если параметр общий, то индексы отсутствуют; $D = d/dt$.

Расчетная схема неизменяемой силовой части МЭГСП изображена на рис.1а, структурная схема нормированной подробной модели на рис.1б. Основные сигналы и параметры МЭГСП обозначены: $U_{рег}$ - регулируемый сигнал; X_a - ход золотника; b - проводимость щели ЗГУ; $K_{ут}$ и $K_{пер}$ - коэффициенты утечек и перетечек; F - площадь поршня; p_1, p_2 - давления в полостях; p_n, p_c - давления нагнетания и слива; Q - компоненты расходов; R - компоненты усилий; y - выходное перемещение; Dy - скорость перемещения; β - коэффициент сжимаемости жидкости в полости, ω_k - кинематически обеспеченная частота для перехода от нормированной скорости к нормированному перемещению.

В модели координат линеаризации для режимов "в большом" (без утечек и линеаризации радикалов расходов ЗГУ) и "в малом" получены уравнения для дифференциального ГД с ЗГУ, для МЭГСП - алгоритм и программа расчета обратной задачи от выходов каналов (заданных средних усилий R_0 и скорости Dy_0) к их входам (смещениям (ходу) золотников X_{a0} и давлениям p_{10}, p_{20} в полостях). Графики функций Dy_0 и X_{a0} от R_0 "в большом" и "в малом" приведены на рис.2. При анализе работы МЭГСП с дифференциальными каналами необходимо учитывать присущие характеристикам зону "заброса" давления и нерабочую зону разрыва потока в полости ГД с большей площадью поршня.

Для уточнения расчета параметров упрощенной динамической модели в приращениях Δ (схема - на рис.3) выведены формулы коэффициентов гармонической линеаризации объединенных нелинейностей компонент расходов щелей ЗГУ и ГД в каждой полости (предлагаемые расчетные схемы объединенных нелинейностей - на рис.4 (а- Q_k от X_a (коэффициент q_{qx}), б- дроссельный эффект (ΔQ_p от Δp и X_a , коэффициенты q_{qp}, q'_{qp} , $W1_{qp} = q_{qp} + jq'_{qp}$). Также учтены нелинейности трения золотника: $W_{tз} = q_{tз} + jq'_{tз}$ и нагрузки: $W1_s = \Delta R_s / \Delta Dy = q_s + jq'_s$.

По результатам исследований получены ПФ неизменяемой части МЭГСП. Для сокращения записи в общем виде использованы обозначения блочных структур ПФ, названных W-ПФ и являющихся дробно-рациональными отношениями типовых звеньев $W1, W12, W2$ и сделан переход от скалярных к матричным уравнениям и матричным ПФ (МПФ).

Приняты обозначения W-ПФ: $WU = WRU/W12p$; $WDy = W1RDy/W12p$, где $W12p = W1_{qp1} \cdot W1_{qp2}$; $W1RDy = F1^2 \cdot W1_{qp2} + F2^2 \cdot W1_{qp1}$;

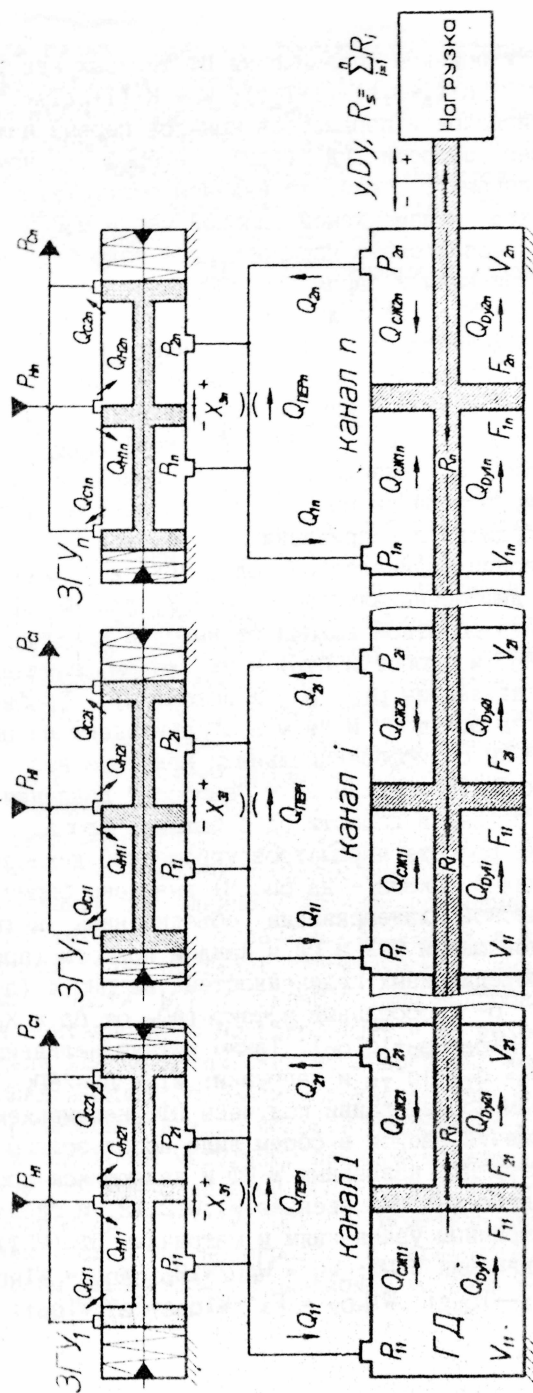


Рис.1а. Расчетная схема силовой неизменяемой части МЭГСП

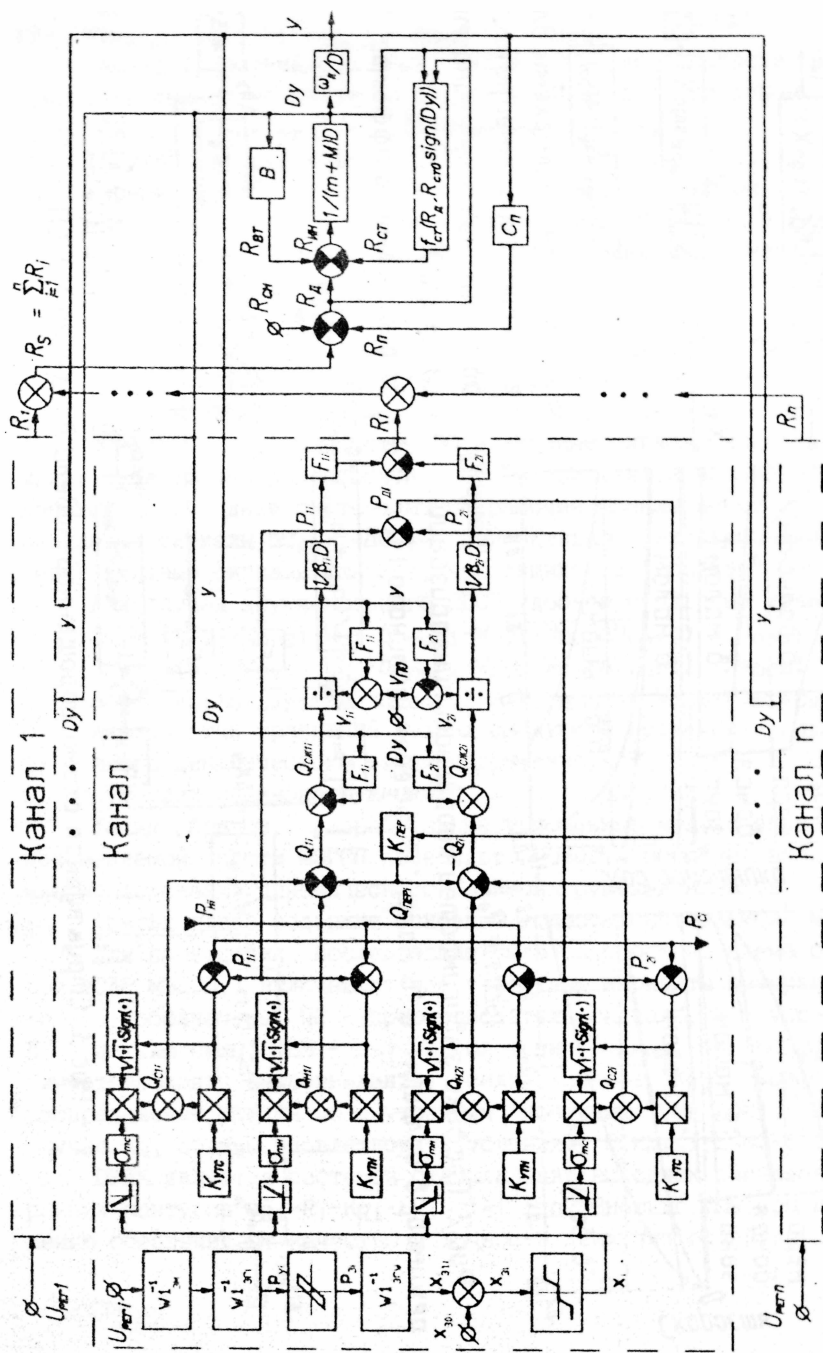


Рис. 16. Структурная схема нормированной подробной математической модели процессов в неизменяемой части МЭСП

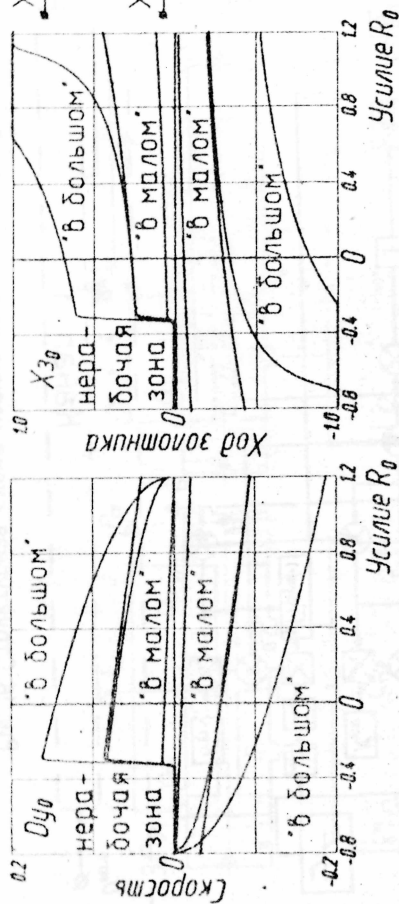


Рис.2. Графики зависимости координат линеаризации

режимов "в большом" и "в малом" дифференциального ГЦ с ЗГУ

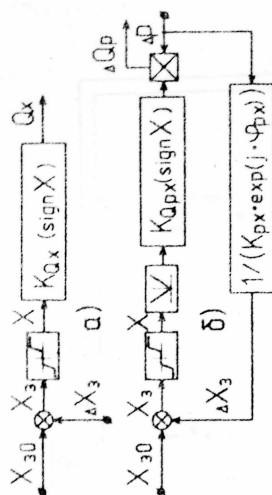


Рис.4. Расчетные схемы для гармонической линеаризации объединенных нелинейностей:

а) Q_x от X_3 ;

б) дроссельного эффекта

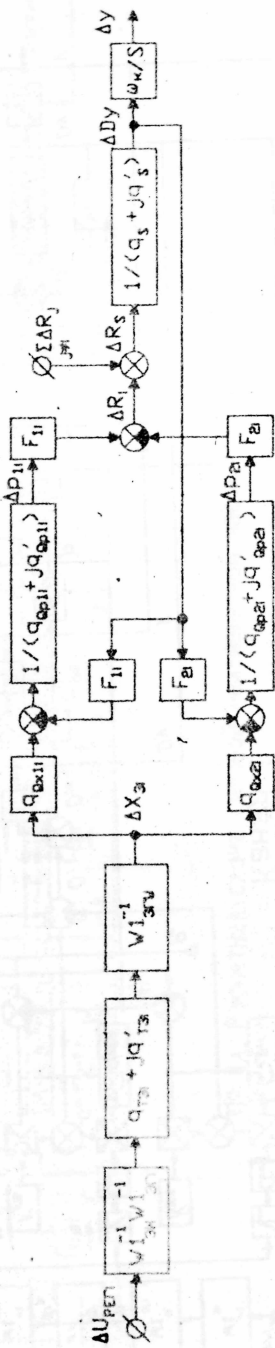


Рис.3. Структурная схема упрощенной модели динамики МЗГП

$$W_{RU} = W_{1\Gamma y}^{-1} \cdot W_{Tz} \cdot W_{1\Gamma r}^{-1} \cdot W_{1\Gamma m}^{-1} \cdot W_{1Rx},$$

$$\text{где } W_{1Rx} = q_{Qx1} \cdot F_1 \cdot W_{1Qp2} + q_{Qx2} \cdot F_2 \cdot W_{1Qp1},$$

Замена уравнений обратных связей (ОС) по скорости $\Delta D y$ на прямые перекрестные связи по сигналам ΔU_{per} дала следующие МПФ:

$$(\Delta R_{nx1} / \Delta U_{per\ nx1}) = (I + W_{Dys})_{nxn}^{-1} \cdot W_{U\ nxn}$$

$$(\Delta D y / \Delta U_{per\ nx1}) = 1_{1xn} \cdot (I + W_{Dys})_{nxn}^{-1} \cdot W_{U\ nxn} / W_{1s}$$

где жирным шрифтом отмечены матрицы, обычным шрифтом - элементы матриц или скаляры, размерности матриц приведены в виде "ixj";

$W_{U\ nxn}$ - диагональная матрица с диагональными элементами W_{U1} ;

1_{1xn} - единичная строка; I_{nxn} - единичная диагональная матрица;

$W_{Dys\ nxn} = W_{Dy\ nx1} \cdot 1_{1xn} / W_{1s}$; $(I + W_{Dys})_{nxn} = I_{nxn} + W_{Dys\ nxn}$.

Для еще большего сокращения записи дополнительно принято:

$$W_0\ nxn = (I + W_{Dys})_{nxn}^{-1} \cdot W_{U\ nxn}. \text{ Тогда:}$$

$$(\Delta R_{nx1} / \Delta U_{per\ nx1}) = W_0\ nxn; (\Delta D y / \Delta U_{per\ nx1}) = 1_{1xn} \cdot W_0\ nxn / W_{1s}$$

Показано, что параметры ПФ и входные сигналы каналов ΔU_{peri} могут существенно различаться, что и приводит к взаимонагрузению каналов. В исходной системе МЭГСП рабочие каналы имеют одинаковые ненулевые сигналы $\Delta U_{peri} = \Delta U_{perj}$ при активном резервировании и нулевые входные сигналы каналов, находящихся в "горячем" резерве.

Для случая двухканального ЭГСП удобнее скалярные уравнения:

$$\Delta R_1 = [(W_{1s} + W_{Dy2}) \cdot W_{U1} \cdot \Delta U_{per1} - W_{Dy1} \cdot W_{U2} \cdot \Delta U_{per2}] / W_{общ};$$

$$\Delta R_2 = [(W_{1s} + W_{Dy1}) \cdot W_{U2} \cdot \Delta U_{per2} - W_{Dy2} \cdot W_{U1} \cdot \Delta U_{per1}] / W_{общ};$$

$$\Delta D y = (W_{U1} \cdot \Delta U_{per1} + W_{U2} \cdot \Delta U_{per2}) / W_{общ}, \text{ где } W_{общ} = W_{1s} + W_{Dy1} + W_{Dy2}.$$

Анализ этих уравнений выявил следующие предельные случаи:

1) полного динамического взаимонагружения: $\Delta R_1 / \Delta R_2 \approx -1$

2) отсутствия взаимонагружения: $\Delta R_1 / \Delta R_2 \approx K$

Таким образом, разработанные упрощенные модели процессов в неизменяемой части МЭГСП позволяют провести основные аналитические исследования динамического взаимонагружения каналов.

Третья глава содержит основные вопросы синтеза МСАР МЭГСП.

Для проведения исследований была разработана схема обобщенной МСАР МЭГСП, включающая все известные варианты резервирования (рис.5, обозначены: ПС - преобразователь сигнала, У - управление, ДС - датчик силы, ДП - датчик положения, $K_{сим1}$ - коэффициенты симметрирования (выравнивания) усилий каналов, K_{R1} - коэффициенты распределения усилий по внутренним контурам каналов). В общем случае K_{R1} должны удовлетворять условиям: $0 < K_{R1} < 1$; $\sum K_{R1} = 1, i = 1 \dots n$.

СУБК является системой стабилизации выходных сигналов внутренних контуров $y_{R1} = R_1 - K_{R1} \cdot \sum R_i, i = 1 \dots n$. Внешние контуры по положению обеспечивают качество и точность движения общей нагрузки.

МКУ МЭГСП с учетом регуляторов включают в себя МКУ неизменяемой части МЭГСП. Так как рассматривается случай работы МСАР МЭГСП, не имеющей активной нагрузки произвольной частоты, и при отсутствии автоколебаний в системе, то доминирующая частота изменения усилий в каналах определяется частотой задающего воздействия по положению, а ПФ и ЛЧХ контуров усилий можно рассматривать с привязкой к ошибке контура слежения по положению.

Матричное уравнение сигналов $\Delta U_{\text{per}i}$ являются следующими:

$$\Delta U_{\text{per}i} = W_{ey} \cdot nx1 \cdot \Delta \varepsilon_y + W_{eR} \cdot nxn \cdot U_{eR} \cdot nx1,$$

где $\Delta \varepsilon_y$ - скалярная ошибка положения общего выхода;

$W_{ey} \cdot nx1$ - столбец W-ПФ регуляторов положения с ПФ датчика ДП;

$W_{eR} \cdot nxn$ - диагональная матрица W-ПФ регуляторов усилий с ДС;

$U_{eR} \cdot nx1$ - матрица-столбец ошибок усилий каналов, равная:

$$U_{eR} \cdot nx1 = K_R \cdot nx1 \cdot 11xn \cdot \Delta R_{nx1} - \Delta R_{nx1} = (K_R \cdot nx1 \cdot 11xn - I_{nxn}) \cdot \Delta R_{nx1},$$

где $K_R \cdot nx1$ - матрица-столбец коэффициентов K_{Ri} . Далее для краткости принято: $(K_R - 1)_{nxn} = (K_R \cdot nx1 \cdot 11xn - I_{nxn})$. Тогда окончательно:

$$\Delta R_{nx1} = (W_0 \cdot nxn^{-1} - W_{eR} \cdot nxn \cdot (K_R - 1)_{nxn})^{-1} \cdot W_{ey} \cdot nx1 \cdot \Delta \varepsilon_y$$

$$\Delta D_y = W_{1s}^{-1} \cdot 11xn \cdot (W_0 \cdot nxn^{-1} - W_{eR} \cdot nxn \cdot (K_R - 1)_{nxn})^{-1} \cdot W_{ey} \cdot nx1 \cdot \Delta \varepsilon_y.$$

Для случая двухканального ЭГСП получены скалярные уравнения.

С учетом обозначений $W_{eRU} = W_{eR} \cdot W_U$; $W_{eyU} = W_{ey} \cdot W_U$ в итоге получено:

$$\Delta R_1 / \Delta \varepsilon_y = [W_{eyU1} \cdot (W_{Dy2} + W_{1s} \cdot (1 + (1 - K_{R2}) \cdot W_{eRU2})) - W_{eyU2} \cdot (W_{Dy1} - W_{1s} \cdot K_{R1} \cdot W_{eRU1})] / W_{0\text{бщ}},$$

$$\Delta R_2 / \Delta \varepsilon_y = [W_{eyU2} \cdot (W_{Dy1} + W_{1s} \cdot (1 + (1 - K_{R1}) \cdot W_{eRU1})) - W_{eyU1} \cdot (W_{Dy2} - W_{1s} \cdot K_{R2} \cdot W_{eRU2})] / W_{0\text{бщ}},$$

$$\Delta D_y / \Delta \varepsilon_y = [W_{eyU1} \cdot (1 + W_{eRU2}) + W_{eyU2} \cdot (1 + W_{eRU1})] / W_{0\text{бщ}},$$

где $W_{0\text{бщ}} = (W_{Dy1} + W_{Dy2} + W_{1s}) + W_{eRU1} \cdot W_{eRU2} \cdot [1 - (K_{R1} + K_{R2})] \cdot W_{1s} + W_{eRU1} \cdot [(1 - K_{R1}) \cdot W_{1s} + W_{Dy2}] + W_{eRU2} \cdot [(1 - K_{R2}) \cdot W_{1s} + W_{Dy1}]$

Проанализированы предельные случаи двухканального ЭГСП:

- 1) отсутствия взаимонагружения: $\Delta R_1 / \Delta R_2 \approx K_{R1} / K_{R2}$;
- 2) "горячий" (облегченный) резерв: $W_{eR1} = 0$; $W_{ey2} = 0$; $K_{R2} = 0$: $\Delta R_2 / \Delta R_1 \approx -0$;
- 3) активный (нагруженный) резерв: $K_{R1} = K_{R2} = 0.5$: $\Delta R_1 / \Delta R_2 \approx K_{R1} / K_{R2} = 1$.

Проведенный анализ свидетельствует о возможности одновременного уменьшения взаимонагружения и ошибки положения с помощью соответствующих регуляторов W_{eRi} и W_{eyi} . Более подробный теоретический анализ является чрезмерно сложным. Согласно с общим мнением, эффективнее экспериментальные исследования (моделирование и испытания). Основным для них выбран метод ЛЧХ с идентификацией параметров моделей МЭГСП. На всех рисунках с ЛЧХ вверху находятся амплитудные (ЛАЧХ, дБ), внизу фазовые характеристики (ФЧХ, °), по оси аргумента в логарифмическом масштабе линейная частота f в Гц.

На основании проведенного анализа и с учетом предыдущего опыта создания МСАР ЭГПДР выработаны основные требования к МСАР МЭГСП для режимов малых перемещений, учитывающие: 1) необходимость уменьшения взаимонагружения каналов, 2) повышения точности регулирования контуров, 3) минимизации сложности их регуляторов.

Первое требование реализовано в СУВК, второе и третье могут быть выполнены с помощью НКУ (точнее псевдолинейных корректирующих устройств (ПЛКУ)) интегрирующего типа с уменьшенным фазовым запаздыванием для САР повышенной точности. При этом в качестве отправной точки были взяты результаты предыдущей совместной работы по НКУ с Кропотовым А.Н., Чельшевым В.А. и Житковым В.В. на кафедрах М7 и М11, в НИИПМ и НИИСМ МГТУ им.Н.Э.Баумана [1,2,5,8].

На рис.6 дана общая схема регулятора с НКУ по патенту [5]. Ей соответствует следующая система разностных уравнений НКУ (знак $D^{\cdot}$ обозначает дифференцирование с фильтрацией шумов и помех):

- 1) $U_{\text{нкү}}(t) = \varepsilon(t) \cdot K_{\text{нкү}}^{\Gamma}(t); \quad \Gamma > 0; \quad K_{\text{нкү}} \geq 0$
- 2) $K_{\text{нкү}}(t) = K_{\text{нкү}}(t-\Delta t) \cdot R_{\text{нкү}}(\varepsilon) + f_{\text{нкү}}(\varepsilon, D\varepsilon^{\wedge}) \cdot (\Delta t / T_{\text{нкү}})$
- 3) $R_{\text{нкү}}(\varepsilon) = \begin{cases} 0 & \text{при } \text{sign}(\varepsilon(t)) \cdot \text{sign}(\varepsilon(t-\Delta t)) = -1 \\ 1 & \text{при } \text{sign}(\varepsilon(t)) \cdot \text{sign}(\varepsilon(t-\Delta t)) = +1 \end{cases}$
- 4) $f_{\text{нкү}}(\varepsilon, D\varepsilon^{\wedge}) = \begin{cases} 1 & \text{НКУ-1} \\ [1 + \text{sign}(\varepsilon(t)) \cdot \text{sign}(D\varepsilon^{\wedge}(t))] / 2 & \text{НКУ-2} \\ \text{sign}(\varepsilon(t)) \cdot \text{sign}(D\varepsilon^{\wedge}(t)) & \text{НКУ-3} \end{cases}$

Так называемые модуляционные автоколебания, возникающие в НКУ при отслеживании низкочастотного задающего сигнала САР, являются основной особенностью работы НКУ в САР [6,7]. При этом в режиме стабилизации САР может быть устойчивой во всей области начальных условий. О подобном явлении упоминается у Е.П.Попова.

Наличие или отсутствие автоколебаний связано с соотношением величин амплитудного запаса устойчивости САР и текущего коэффициента передачи НКУ $dU_{\text{нкү}}/d\varepsilon \approx K_{\text{нкү}}^{\Gamma}(t)$ (см.рис.6). Функция $K_{\text{нкү}}^{\Gamma}(t)$ интегрально участвует в формировании коэффициента передачи НКУ в частотной области и для идеальных ЛЧХ в низкочастотной области должна достигать величин, превышающих запас устойчивости. Из-за модуляционных колебаний не удается достичь повышения точности, рассчитанного классическим способом по ЛЧХ разомкнутой системы.

В результате исследований с целью улучшения функционирования САР с НКУ был разработан способ регулирования [9] с НКУ; названным управляемым интегратором (УИ). Управляют входным и выходным сигналами УИ: для уменьшения запаздывания применяют управляемый фазопередающий фильтр (ФФ) на входе интегратора и обнуление или установка выхода УИ. На рис.7 даны схемы САР с УИ и элемента УИ.

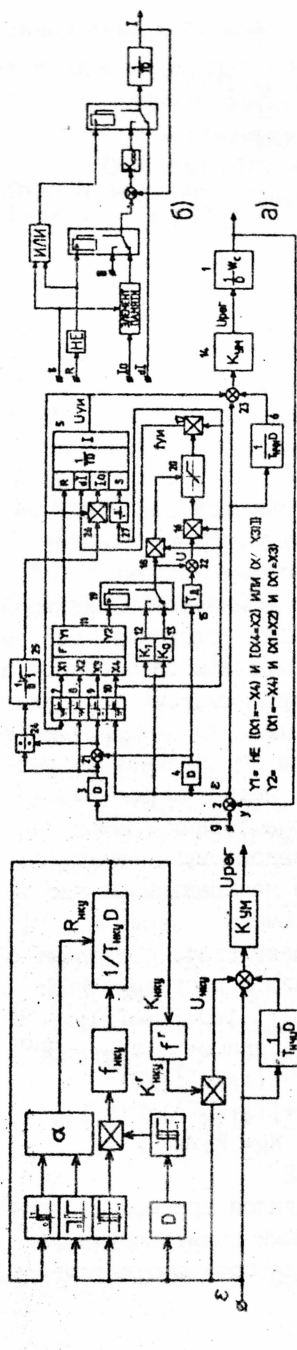


Рис.6. Структурная схема регулятора с НКУ

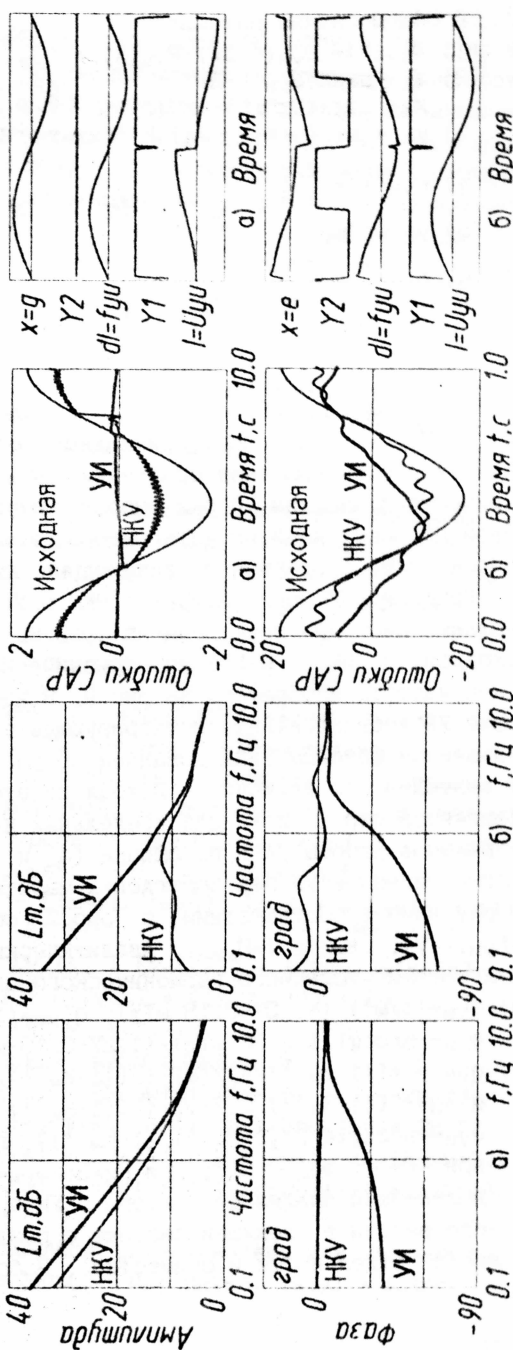


Рис.8. Графики ЛЧХ регулятора с УИ и НКУ в идеальных системах: а)разомкнутой; б)следящей

В общем случае математическая модель УИ является следующей:

- 1) $U_{\text{УИ}}(t) = U_{\text{УИ}}(t-\Delta t) \cdot R_{\text{УИ}}(x) + f_{\text{УИ}}(x) \cdot (\Delta t / T_{\text{УИ}})$
- 2) $x_1 = \text{sign}(U_{\text{УИ}}(t-\Delta t)); \quad x_2 = \text{sign}(Dg^{\wedge}(t))$
 $x_3 = \text{sign}(Dg^{\wedge}(t) - D\hat{\varepsilon}(t)); \quad x_4 = \text{sign}(\varepsilon(t))$
- 3) $y_1 = \text{НЕ} \{ (x_1 = -x_4) \text{ И } [(x_4 = x_2) \text{ ИЛИ } (x_4 = x_3)] \}$
- 4) $R_{\text{УИ}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } y_1 = 0 \\ 1 & \text{при } y_1 = 1 \text{ и } x_4 \neq 0 \\ 0 < Dg^{\wedge}(t) / (Dg^{\wedge}(t) - D\hat{\varepsilon}(t)) < 1 & \text{при } y_1 = 1 \text{ и } x_4 = 0 \end{cases}$
- 5) $y_2 = (x_1 = -x_4) \text{ И } (x_1 = x_2) \text{ И } (x_1 = x_3)$
- 6) $K(x) = \begin{cases} K_0 < K_1 & \text{при } y_2 = 0 \text{ (нормальный режим)} \\ K_1 > K_0 & \text{при } y_2 = 1 \text{ (режим перерегулирования)} \end{cases}$
- 7) $f_{\text{УИ}}(x) = \begin{cases} K(x) \cdot \varepsilon(t) + T_{\text{Д}} \cdot D\hat{\varepsilon}(t) & \text{при } \varepsilon(t) \cdot D\hat{\varepsilon}(t) < 0 \\ K(x) \cdot \varepsilon(t) & \text{при } \varepsilon(t) \cdot D\hat{\varepsilon}(t) > 0 \end{cases}$

Для анализа САР с НКУ и УИ использовался созданный в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана пакет прикладных программ моделирования динамических систем PDS. Для сравнения характеристик УИ и НКУ и параметрического анализа УИ был выбран объект с типовой для ЭГПДР линейной ПФ, состоящей из интегратора, колебательного W_2^{-1} и апериодического W_1^{-1} звеньев с одинаковыми постоянными времени.

Графики ЛЧХ регуляторов с НКУ и УИ в разомкнутой и следящей идеальных системах приведены на рис.8. Ошибки слежения систем (исходной, с НКУ, с УИ) за гармоническим сигналом сверхнизкой и низкой частоты изображены на рис.9. В идеальной системе у регулятора с УИ псевдолинейные интегрирующие свойства по амплитуде с уменьшенным фазовым запаздыванием сохраняются до сверхнизких частот вынужденного движения. Исходя из этого, получены формулы коэффициентов передачи УИ для предельных низкочастотных гармонических режимов работы САР: по ошибке (а) и по задающему сигналу (б). Графики сигналов УИ без соблюдения масштабов изображены на рис.10 (сверху вниз в соответствии с рис.7 обозначены: вход x , y_2 , $dI = I_{\text{УИ}}$, y_1 , выход $I = U_{\text{УИ}}$). Аналитические результаты совпадают с результатами численного гармонического анализа в программе PDS:

- а) $\varphi_{\text{УИ}} = (1/\omega T) \cdot (+1.27 - 0.13 \cdot \omega T_{\text{Д}}); \quad \varphi'_{\text{УИ}} = (1/\omega T) \cdot (-1 + 0.32 \cdot \omega T_{\text{Д}});$
 $\varphi_{\text{УИ}} = -\arctg[(1 - 0.32 \cdot \omega T_{\text{Д}}) / (1.27 - 0.13 \cdot \omega T_{\text{Д}})]; \text{ при } \omega \rightarrow 0: \varphi_{\text{УИ}} \rightarrow -38^\circ;$
- б) $\varphi_{\text{УИ}} = +[(1 - K_{\text{К}}^{-1})/\pi] / (\omega T \cdot \{ [(1 - K_{\text{К}}^{-1})/\pi]^2 + [(1 + K_{\text{К}}^{-1})/2]^2 \});$
 $\varphi'_{\text{УИ}} = -[(1 + K_{\text{К}}^{-1})/2] / (\omega T \cdot \{ [(1 - K_{\text{К}}^{-1})/\pi]^2 + [(1 + K_{\text{К}}^{-1})/2]^2 \});$
 $\varphi_{\text{УИ}} = -\arctg[\pi/2 \cdot (1 + K_{\text{К}}^{-1}) / (1 - K_{\text{К}}^{-1})], \text{ где } K_{\text{К}} = K_1/K_0 \gg 1;$
 при $K_{\text{К}} \rightarrow \infty: \varphi_{\text{УИ}} \rightarrow -58^\circ; \text{ при } K_{\text{К}} = 3: \varphi_{\text{УИ}} = -72^\circ.$

Дальнейший анализ регулятора с УИ проводился при моделировании его работы в следящей системе с различными возмущающими факторами (по отдельности и совместно). Набор факторов соответствует

работе реального ЭГПДР с микропроцессорной СУ (МПСУ). На рис.11 дана блок-схема САР с УИ с учетом возможных возмущающих факторов. Характер влияния факторов на ЛЧХ регулятора одинаков, за исключением влияния зоны нечувствительности на входе объекта. На рис.12 даны графики ЛЧХ регулятора с УИ в САР с учетом наличия факторов по отдельности и совместно за исключением зоны нечувствительности. Чем больше величины факторов, тем слабее влияние УИ в САР.

Общим недостатком НКУ и УИ является их плохая помехозащищенность из-за использования в них производных основных сигналов САР, которые в отсутствии датчиков скорости в безредукторном приводе можно получить только операцией дифференцирования. Было исследовано численное дифференцирование после сглаживания по МНК *.

Его разностное уравнение и дискретная ПФ (ДПФ) следующие:

$$\hat{Dy}[k] = K_n \cdot \sum_{m=1:n} m \cdot (y[k-n+m] - y[k-n-m]); \quad W_z = K_n \cdot \sum_{m=1:n} z^{-n} \cdot m \cdot (z^m - z^{-m}),$$

где $K_n = 3/[n \cdot (n+1) \cdot (2n+1)]$, n - порядок сглаживаемого полинома.

Для оценки фильтрующих свойств можно обратным билинейным преобразованием с уществить переход от ДПФ к непрерывной ПФ с постоянной времени $T_0 = 1/f_T$, где f_T - частота дискретизации:

$$W_T \approx T_0 \cdot K_n \cdot \sum_{m=1:n} \left(\frac{2m^2 \cdot (1 + (mT_0s)^2/6)}{(1 + T_0s/2)^{2m}} \right) \cdot \left(\frac{1 - T_0s/2}{1 + T_0s/2} \right)^{n-m}$$

Фильтр низких частот (ФНЧ) ПФ можно приближенно считать суммой ФНЧ второго порядка с коэффициентами демпфирования 0.7..1.0.

Получены рекуррентные зависимости, алгоритм и программа с нулевыми методической и вычислительной погрешностями, с малыми затратами вычислительных ресурсов независимо от порядка n , определяющего с f_T постоянную времени ФНЧ: $T_{ФНЧ} \approx 2/\pi \cdot (n/f_T)$.

$$\text{Рассматриваются: } \Delta y_n[k] = \sum_{m=-n:n} (m \cdot y[k-n+m]); \quad \Sigma y_n[k] = \sum_{m=-n+1:n} (y[k-n+m])$$

$$\text{Используются рекурсии: } \Sigma y_n[k] = \Sigma y_n[k-1] + y[k] - y[k-2n]$$

$$\Delta y_n[k] = \Delta y_n[k-1] + n \cdot (y[k] + y[k-2n-1]) - \Sigma y_n[k-1]$$

$$\text{Последняя операция: } \hat{Dy}[k] = \Delta y_n[k] \cdot K_n$$

Два случая последовательной смены порядка n :

$$1) \text{ от } n \text{ к } n+1: \Sigma y_{n+1}[k] = \Sigma y_n[k] + y[k-2n] + y[k-2n-1];$$

$$\Delta y_{n+1}[k] = \Delta y_n[k] + \Sigma y_{n+1}[k] + y[k] - (n+1) \cdot (y[k-2n-1] + y[k-2n-2])$$

$$2) \text{ от } n \text{ к } n-1: \Sigma y_{n-1}[k] = \Sigma y_n[k] - y[k-2n+1] + y[k-2n+2];$$

$$\Delta y_{n-1}[k] = \Delta y_n[k] - \Sigma y_n[k] - y[k] + n \cdot (y[k-2n+1] + y[k-2n])$$

* К р и Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. - М.: Наука, 1934. - С.696.

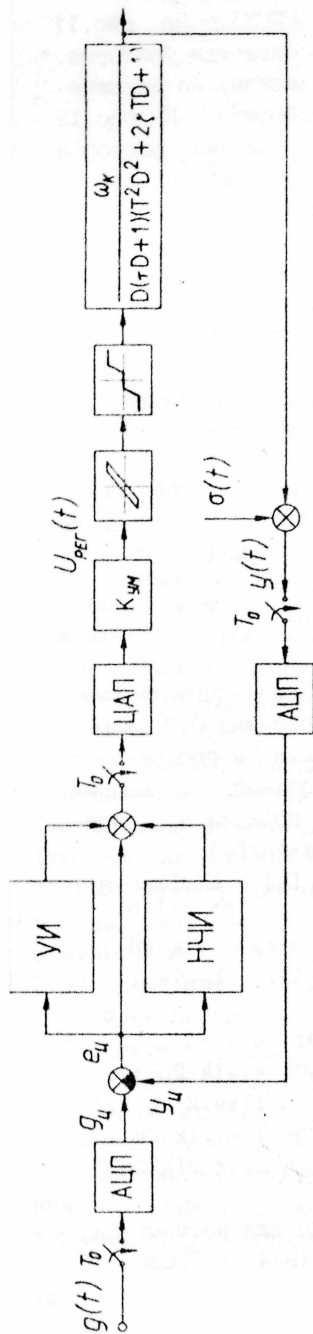


Рис.11. Блок-схема САР с УИ и с возмущающими факторами

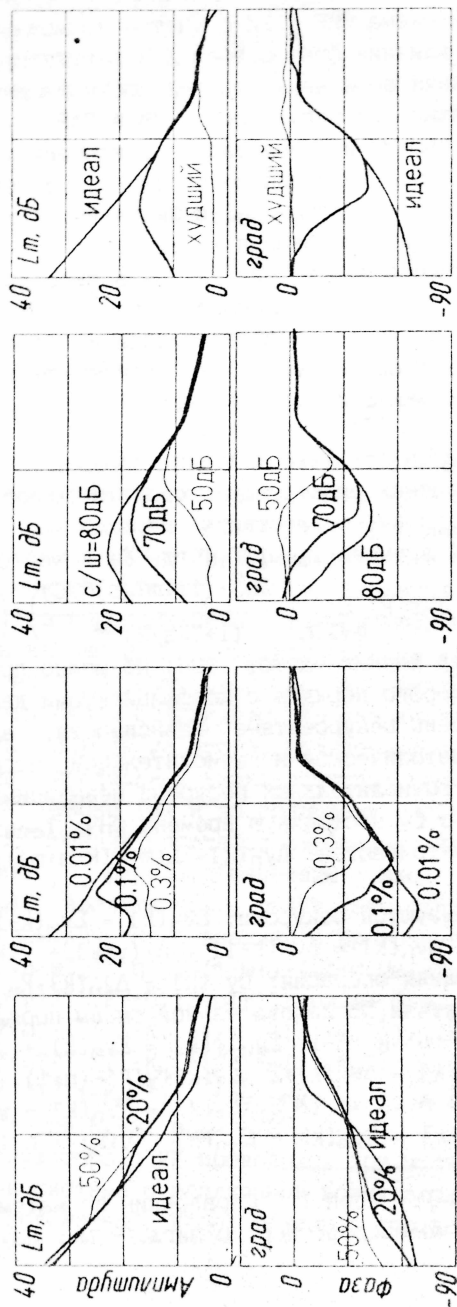


Рис.12. Графики ЛЧХ регулятора с УИ в случае действия: а) нечувствительности; б) гистерезиса; в) шума в выходном сигнале; г) совместного б), в) и цифровых эффектов

Для общности анализа удобна нормировка по обобщенному параметру (n/f_T) : $\omega_n = \omega \cdot n/f_T$ или $f_n = f \cdot n/f_T$. С аргументом ω_n или f_n ЛЧХ дифференцирования перестают зависеть от n и f_T . Графики ненормированных и нормированных ЛЧХ при разных n и f_T даны на рис.13.

В работе показано, что на ЛЧХ слабо влияют такие возмущающие факторы, как квантование по уровню и высокочастотный шум дифференцируемого сигнала. Но они сильно искажают величину и знак вычисленной скорости $DY^{\wedge}$ и их наличие приводит к появлению в $DY^{\wedge}$ по сравнению с идеальной скоростью $DY_{ид}$ зон ложного нуля (от квантования, рис.14) и ложного знака скорости (от шума и запаздывания ФНЧ). Эти зоны отрицательно сказываются на свойствах НКУ и УИ.

По соотношению интегральных величин зон ложного и истинного знака можно сформулировать численные критерии качества дифференцирования с учетом квантования, шума и запаздывания ФНЧ в виде:

$$S_i = 1/(t_1 - t_0) \cdot \int_{t_0}^{t_1} [\text{sign}(DY^{\wedge}) \cdot \text{sign}(DY_{ид})] \cdot dt; K_i = (1 + S_i)/(1 - S_i).$$

На рис.15 даны ЛЧХ $20lg(K_i)$ при дифференцировании синуса с постоянными малыми амплитудой, частотой и разными (n/f_T) при действии: только ФНЧ (а), совместно всех факторов (б). С учетом рекомендуемой нормы $20lg(K_i) > 10$ дБ существуют частотные диапазоны качественного дифференцирования, определяемые (n/f_T) и соотношениями величин параметров дифференцируемого сигнала и факторов. Нижняя граница диапазона определяется действием квантования и шума, верхняя - ФНЧ. Увеличение (n/f_T) при прочих неизменных условиях приводит к смещению диапазона в более низкочастотную область.

Помимо численных критериев в работе также получен аналитический критерий качества дифференцирования для сигнала типа цифрового синуса с частотой $f < f_T$ и без помех. В этом случае эффект дискретизации по времени практически не влияет на форму входного сигнала, но существенно усиливает искажения его скорости. Полученный аналитический критерий позволяет при известных рабочих амплитудах и частотных диапазонах дифференцируемого сигнала (см.рис.16) правильно определить соотношение $K_{цп} \cdot n/f_T$, где $K_{цп}$ - коэффициент передачи, определяемый разрядностью АЦП, и получить при вычислении необходимые форму и величины сигнала скорости.

Критерии показывают, что расширение рабочей частотной полосы при совместном учете влияния двух цифровых эффектов можно проводить за счет подстройки параметра (n/f_T) , проще - рекуррентного изменения n на ± 1 или его сброса до 1, что необходимо для сохранения качества вычисленной скорости и устойчивости цифровой САР.

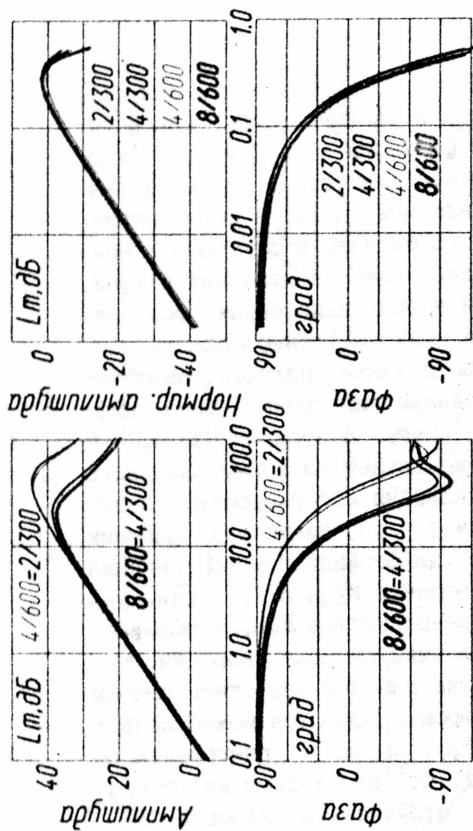


Рис.13. ЛЧХ дифференцирования при разных величинах (n/f_T)

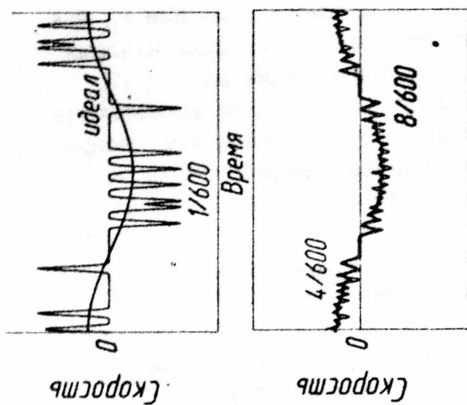


Рис.14. Сигналы малой скорости при разных (n/f_T)

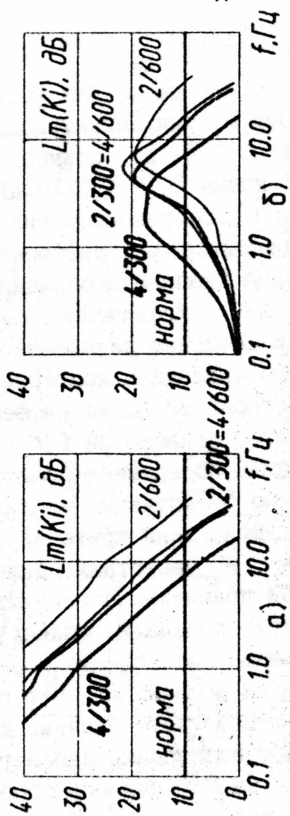


Рис.15. ЛЧХ интегрального критерия K_i дифференцирования при разных (n/f_T) с учетом: а) только ФНЧ; б) всех факторов

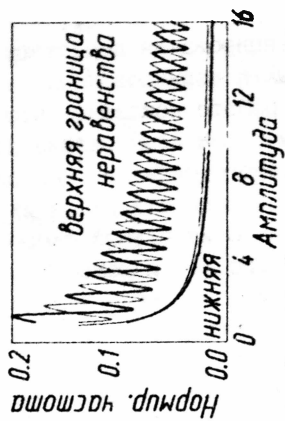


Рис.16. Графики функций аналитического критерия

Общие результаты исследований УИ в САР и формулы дифференцирования могут найти применение в различных перспективных СУ.

В четвертой главе описана прикладная методика многовариантного исследовательского проектирования МСАР МЭГСП, состоящая из двух частей: анализа взаимонагружения каналов МЭГСП и синтеза параметров МСАР. Принципиальным в разработанной методике является использование классического метода ЛЧХ разомкнутых систем при условии, что ЛЧХ сняты при работе соответствующих замкнутых систем.

Для оценки взаимонагружения любого числа каналов МЭГСП предложен критерий, названный коэффициентом взаимонагружения (KB):

мгновенный в общем виде: $KB = |R_s| / \sum_{i=1, n} |R_i| = \left| \sum_{i=1, n} R_i \right| / \sum_{i=1, n} |R_i|$, или

амплитудный в гармоническом анализе динамики: $KB = A_{R_s} / \sum_{i=1, n} A_{R_i}$.

В отсутствии взаимонагружения $KB = 1$, при большом взаимонагружении $KB < 1$. Так как диапазон изменения KB может быть очень большим, то лучше применять логарифмический KB (ЛKB) $20 \lg KB$, дБ.

Без датчиков усилий ДС возможно определение сигналов усилий ГД через сигналы часто используемых датчиков перепадов давлений (ДПД). Получены формулы преобразования сигналов и оценка их погрешности в зависимости от соотношения площадей поршня ГЦ.

При известных ПФ неизменяемой части синтез регуляторов часто проводят для худшего случая, в данном случае максимального взаимонагружения каналов. Поэтому задачей анализа МЭГСП следует считать поиск в пределах заданных технических условий экстремального сочетания величин параметров каналов МЭГСП по критерию минимума KB. Выбран поисковый метод покоординатного спуска с варьируемыми параметрами, расставленными в приоритетном порядке.

Варьируемые параметры в МЭГСП можно разделить на общие для всех каналов и каналные. Следует считать основными параметрами: - общие: параметры сухого и вязкого трения, инерции нагрузки, средней координаты; - каналные: средние усилия (вместо обычно рассматриваемых смещений нулей золотников), нечувствительность и гистерезис, постоянную времени и коэффициент ЭГУ. Экстремальный набор величин параметров можно практически определить в экспериментальном исследовании реального МЭГСП или его моделировании.

Далее по экспериментальным ЛЧХ и характеристикам из способа безразборного контроля ЭГПДР с ЭГУ [4] следует провести параметрическую идентификацию моделей привода (в первую очередь его ПФ) для проверки соответствия моделей процессов друг другу и их реальным образам и для последующего синтеза регуляторов МСАР.

Методика синтеза регуляторов МЭГСП является итерационной, основанной на принципе "от простого к сложному" и учитывающей основные требования к МСАР, МЭГСП из третьей главы.

Критериями параметрического синтеза в заданных типовых режимах движения выходного звена МЭГСП являются: 1) удовлетворительная устойчивость замкнутых контуров; 2) требуемое уменьшение взаимонагружения каналов; 3) требуемые точность и качество движения.

Для метода ЛЧХ должен быть осуществлен пересчет типовых требований к замкнутой системе в требования к разомкнутой системе.

Так как для МЭГСП необходима МПСУ, то синтез следует начать сразу со взаимосвязанного выбора ее базовых цифровых параметров.

Для варианта активного резерва показано, что простым эффективным средством снижения взаимонагружения является выравнивание (симметрирование) коэффициентов передачи от общих сигналов регулирования до усилий каналов. Другим средством является компенсация различий исходных смещений нулей ЭГУ каналов и их временных дрейфов, а также постоянных составляющих ошибок контуров с помощью цифровых низкочастотных интеграторов (НЧИ). Их число следует выбирать равным числу работающих каналов МЭГСП.

Представлен параметрический синтез динамических составляющих регуляторов МСАР каналов при заданном или экстремальном наборе величин параметров и условий работы неизменяемой части МЭГСП.

Выделены четыре основных этапа динамического синтеза МСАР:

- 1) "холодный" резерв с УИ или НКУ (одноканальный вариант);
- 2) активный и "горячий" резервы с УИ или НКУ во внешнем контуре, но без внутренних контуров по усилиям;
- 3) синтез внутренних контуров (СУБК) для активного и "горячего" резервов при работающем УИ или НКУ во внешнем контуре;
- 4) итоговая проверка: внешний контур с УИ или НКУ и СУБК.

По окончании анализа и синтеза по снятым характеристикам систем предложены рекомендации по выбору необходимых вариантов для снижения объема работы на следующих стадиях проектирования.

Пятая глава посвящена применению созданной методики и экспериментальным исследованиям МСАР опытного образца тандемного двухканального привода РА82 производства НПООТ "Родина". Особенностью неизменяемой части РА82 является конструктивное различие дифференциального и симметричного каналов, особенностью технических требований в типовых гармонических режимах малых (амплитуда 1 мм (1% от максимально возможной)) и микро перемещений (0.1мм (0.1%)) - малые фазовые запаздывания замкнутой системы (показатель точ-

ности), малый (не более 1 дБ) резонансный всплеск (показатель качества) и уменьшение (не менее 10 раз) взаимонагружения каналов. Выполнение требований может обеспечить только высокоточная МПСУ.

В рамках анализа взаимонагружения каналов поиск экстремального набора величин параметров отражает следующие закономерности:

- рост взаимонагружения при росте различий параметров каналов, особенно ухудшения динамики дифференциального канала;
- противоречивое влияние общей нагрузки на процессы в приводе: при ее увеличении взаимонагружение уменьшается, но ухудшается точность. Более высокий приоритет имеет критерий взаимонагружения, поэтому в худшем варианте общая нагрузка взята минимальной.

Выполнены идентификации параметров ПФ и проверки соответствия моделей процессов друг другу по ЛЧХ неизменяемых частей контуров. Результаты подтверждают необходимость учета процессов в каждой полости ГД каналов при определении ПФ их усилий.

Проведены многовариантный синтез и экспериментальные исследования цифровых МСАР МЭГСП РА82 в активном (А) и "горячем" (Г) резервировании, с ЛКУ и УИ. Блочные структурные схемы этих систем приведены на рис.17. На рис.18 выборочно представлены ЛЧХ, полученные в ходе синтеза. Для удобства обзора графики представлены раздельно столбцами по трем вариантам-направлениям (с НКУ, с УИ и экстремальный с УИ) и строками по ЛЧХ внешних контуров, ЛЧХ внутренних контуров, ЛКВ каналов исходных и скорректированных систем.

Лучшим является активный резерв с симметрированием каналов по усилиям и с УИ во внешнем контуре. Он удовлетворяет всем типовым требованиям и в случае конкретного и в случае экстремально худшего образцов РА82: при отработке сигнала синуса с амплитудой 1% от максимально возможной и с частотой в 4 раза меньше частоты среза взаимонагружение уменьшено от 15 до 60 раз в зависимости от параметров неизменяемой части, точность увеличена в 4 раза.

В приложениях приведены выкладки уравнений и формул, полученных автором, исходный текст программы дифференцирования, а также документы о внедрении материалов и результатов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать общие выводы:

1. Предлагаемые методы проектирования МСАР позволяют повысить долговечность и точность МЭГСП.

2. Удовлетворительное совпадение результатов натурных, моделирующих и теоретических исследований свидетельствует в целом о достоверности основных положений и решений задач диссертации.

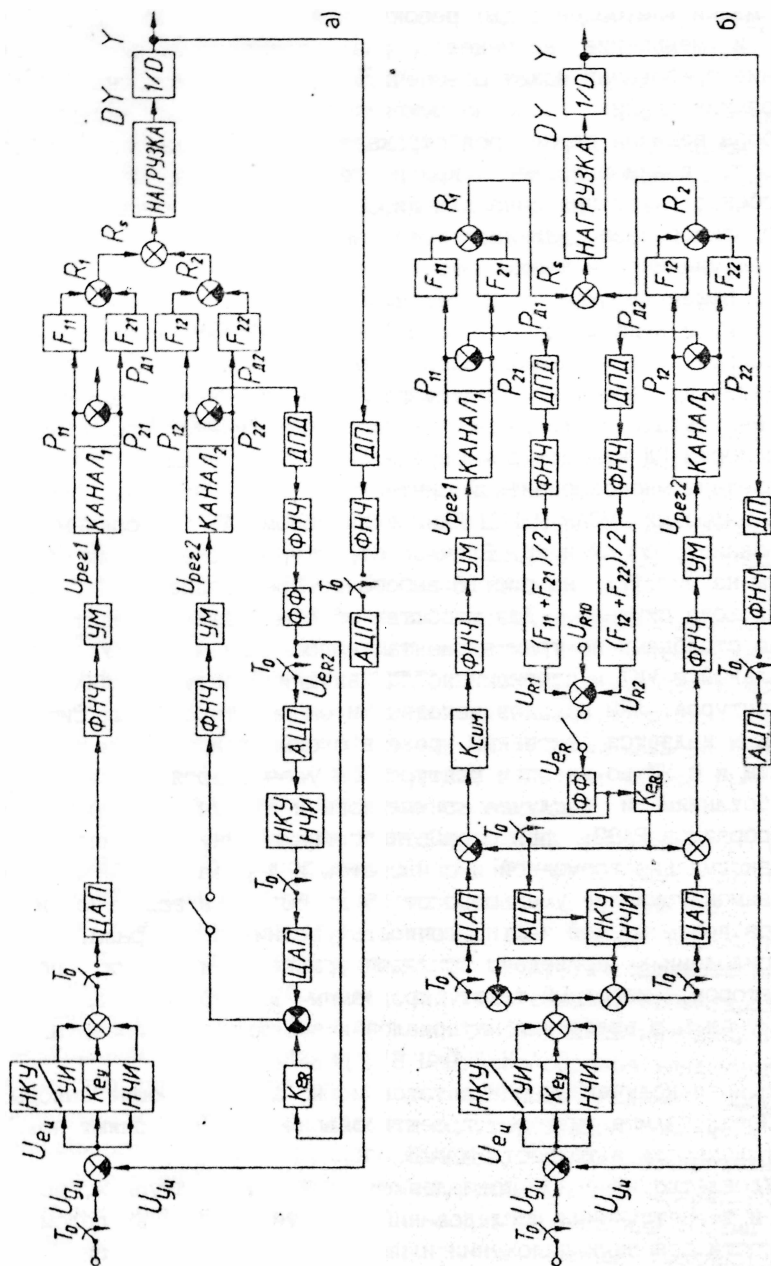


Рис.17. Структурные блок-схемы цифровых МСАР МЭГСП РА82.

а) вариант "горячего" резерва; б) вариант активного (нагруженного) резерва

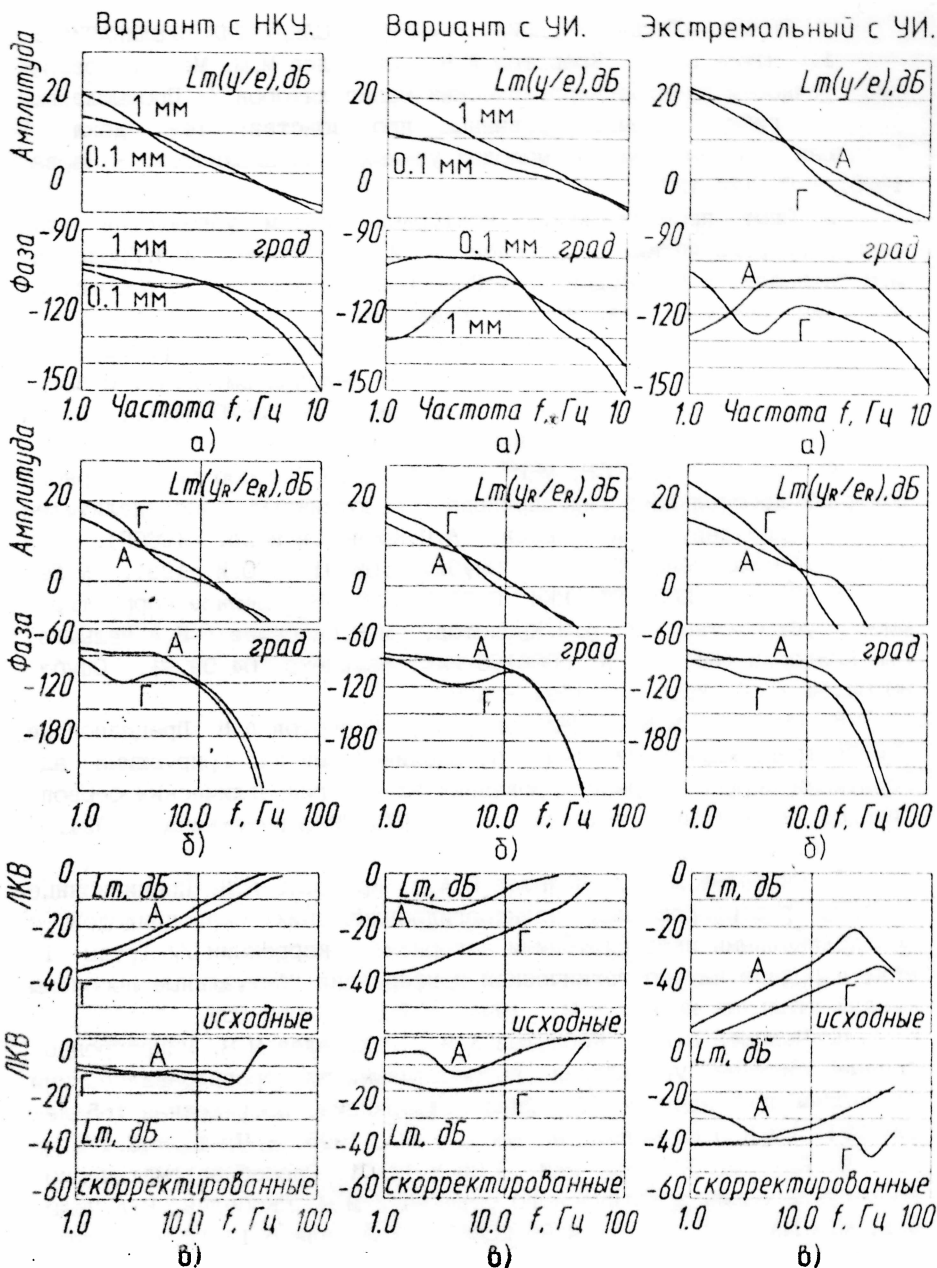


Рис.18. Графики ЛЧХ МЭГСП РА82:
а) внешние контуры; б) внутренние контуры; в) ЛКВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. тиков В.Б., Кропотов А.Н., Скобелев М.М. Методы повышения точности электрогидравлических манипуляторов // Промышленные роботы и гибкие автоматизированные производства: Тез. докл. V Всесоюз. школы-семинара молодых ученых и специалистов. - Ларва, 1986. - С. 124-127.

2. Опыт проектирования контурных систем управления для электрогидравлических приводов / И.И.Зайченко, А.Н.Кропотов, М.М.Скобелев, Б.И.Скобцов // V Всесоюзное совещание по робототехническим системам: Тез. докл. - Киев, 1987. - Ч.1. - С.201-203.

3. Разработка адаптивных систем управления электрогидравлическими приводами с низким механическим резонансом: Отчет о НИР / МВТУ; Руководитель Л.Д.Нечаев. - М-7-58. N ГР 02870082512; Инв. N 0270000671. - М., 1987. - Кн.2 - С.3-48.

4. А.с.1668748 СССР, МКИ³ F 15 В 19/00. Способ безразборного контроля дроссельного гидропривода с золотниковым распределителем / М.М. Скобелев, В.А.Челышев, А.Н.Кропотов и др. (СССР). - N 4653013/29; Заявлено 22.02.89; Опубл.07.08.91 // О.И.-1991.- N 29.

5. Пат. 2012029 РФ, МКИ³ G 05 В 5/01. Нелинейное корректирующее устройство / А.Н.Кропотов, М.М.Скобелев, В.А.Челышев, Г.В.Бондарев (РФ). - N 5006190/24; Заявлено 04.09.91; Опубл. 30.04.94 // О.И.,... - 1994.- N 8.

6. Скобелев М.М., Челышев В.А., Кропотов А.Н. Прецизионные самонастраивающиеся системы с псевдолинейными интегрирующими алгоритмами коррекции резервированных электрогидравлических сервоприводов // Оборонная техника. - М.: НТЦ "Информтехника", 1994. - N 1. - С.64-68.

7. Скобелев М.М., Челышев В.А., Кропотов А.Н. Прецизионные системы резервированных электрогидравлических сервоприводов с псевдолинейными интегрирующими алгоритмами коррекции // Труды II Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук". - М., 1994. - Т.6.- С.Д52-Д55.

8. Челышев В.А., Кропотов А.Н., Скобелев М.М. Микропроцессорные системы управления высокоточными электрогидравлическими следящими приводами // Юбилейная конференция, посвященная 165-летию МВТУ им.Н.Э.Баумана: Тез.докл. - М., 1995. - Ч. 1. - С.176.

9. Пат. 2103714 РФ, МКИ³ G 05 В 11/01. Способ автоматического регулирования астатического объекта / М.М. Скобелев, В.А.Челышев, М.М.Малютин (РФ). - N 96123665/09; Заявлено 17.12.96; Опубл. 01.01.98 // О.И.,... - 1998. - N 3.