

1442

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
СССР

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ИМЕНИ ЛЕНИНСКОГО КОМСОМОЛА

---

На правах рукописи

ПОДЛИНЕВА Татьяна Константиновна

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ КОРРЕКТИРУЮЩИХ  
СВЯЗЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
УПРУГИМИ МЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Специальность 05.13.14 -

"Автоматическое управление и регулирование  
(по отраслям)"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата технических наук

Челябинск - 1977

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте  
имени Ленинского комсомола

Научный руководитель  
заслуженный деятель науки и техники РСФСР  
профессор доктор технических наук

ЧЕРНОРУЦКИЙ Г.С.

Официальные оппоненты:  
профессор доктор технических наук  
старший научный сотрудник  
доктор технических наук

ЯКОВЛЕВ Б.С.

ГАФИЯТУЛЛИН Р.Х.

Ведущее предприятие - указано в решении совета.

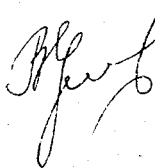
Защита состоится 30 ноября 1977 года на заседании  
Специализированного совета Д053.13.01 по присуждению ученых  
степеней Челябинского политехнического института имени  
Ленинского комсомола - пр.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Автореферат разослан 29 октября 1977 года.

Ученый секретарь Специализированного совета  
профессор доктор технических наук

ЦЫГАНКОВ В.А.



Актуальность тем. В отчетном докладе Генерального секретаря ЦК тов. Л. И. Брежнева XXV съезду отмечалось, что только на основе ускоренного развития науки и техники может быть решена конечная задача революции социальной – построено коммунистическое общество. Стремительное развитие современной техники ставит перед автоматическими системами, применяемыми как в промышленности, так и для управления различного рода сложными объектами, новые трудные задачи, однако основными остаются задачи обеспечения требуемых точности и качества процессов управления. Сложность проектирования систем определяется не только жесткостью требований, предъявляемых к качеству процессов управления, но и специфическими особенностями объектов.

Общеизвестны трудности проектирования систем управления для упругих сложных механических объектов, с возможно меняющимися в процессе управления моментом инерции и жесткостью конструкции. Рекомендации по решению задачи проектирования, предложенные на сегодняшний день в отечественных и зарубежных работах, не являются универсальными и не учитывают случайного характера коэффициента демпфирования и резонансной частоты систем управления.

Цель работы. Целью настоящей работы является постановка, разработка методик и решение задач синтеза и исследования корректирующих связей для систем управления упругими сложными механическими объектами с высокими статическими и динамическими качествами. В рамках сформулированной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи:

1. Синтез и исследование корректирующих устройств с демпфирующими свойствами для систем управления со случайными величинами коэффициента демпфирования и резонансной частоты.
2. Синтез корректирующих связей в подсистемах индикации угла, используемых в каналах обратной связи систем управления типа "напряжение – угол", с учетом фазовых погрешностей и шумов датчиков подсистем.
3. Синтез и исследование корректирующей связи для компенсации случайного момента сухого трения в механических звеньях систем управления.

Методы исследований. Методики синтеза корректирующих связей разработаны на основе теории оптимальной нелинейной фильтрации и

способа периодической коммутации, предложенного в работе. Исследования разработанных структурных схем корректирующих связей имели комплексный характер и включали: аналитические исследования, исследование цифровых и полунатурных моделей систем с коррекцией предложенного вида.

Научная новизна. 1. Разработана методика синтеза полосовых корректирующих устройств с демфирующими свойствами для систем управления упругими сложными механическими объектами со случайными величинами коэффициента демпфирования и резонансной частоты. Исследованы корректирующие свойства разработанных устройств.

2. Предложен способ периодического преобразования структуры индукционных датчиков, обеспечивающий фазовую модуляцию их выходных сигналов. Способ и схемы индукционных датчиков с переменной структурой защищены авторскими свидетельствами и зарубежными патентами.

3. Разработана методика синтеза оптимальной структуры подсистемы индикации угла с учетом фазовой неидентичности каналов, фазовых погрешностей и шумов датчика. Оптимальная схема подсистемы индикации с датчиком типа фазовращателя с переменной структурой защищена авторским свидетельством.

4. Проанализированы особенности синтеза оптимальной структуры следящей системы с учетом фазовых погрешностей и шумов датчика обратной связи на основе фазовращателя с переменной структурой.

5. Предложена методика синтеза оптимальной связи, компенсирующей случайный момент сухого трения в механических звеньях систем управления. Проведен сравнительный анализ влияния на динамику и статику систем предлагаемого и известных методов компенсации трения.

Практическая ценность. 1. На основе предложенных методик разработаны структуры корректирующих связей со следующими свойствами: демфирующими - для систем управления со слабодемпфированными звеньями; компенсирующими случайный момент сухого трения в механических звеньях систем управления; корректирующими, обуславливающими повышенную точность и линейность преобразования подсистемами индикации угла. 2. Разработаны схемы индукционных датчиков с переменной структурой. 3. Предложена оптимальная структура следящей системы с датчиком обратной связи на основе фазовращателя с переменной структурой. 4. Разработанные корректирующие связи исследованы методами цифрового и полунатурного моделирования. 5. Свойства разработанных устройств подтверждены результатами промышленного использования.

Реализация работы в промышленности. Разработанные индукционные датчики использованы в измерительных блоках фазоимпульсных систем числового программного управления на предприятии ЛЭМЗ (г. Ленинград). Битный образец измерительного блока прошел испытания заводских условий. Методики синтеза и реализованные на их основе структурные схемы корректирующих устройств с демпфирующими и компенсирующими сухое трение свойствами внедрены в испытательном оборудовании на ряде предприятий.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- XXV-XX научно-технических конференциях Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола 1972-1977;
- I Всесоюзной конференции по стохастическим системам управления (г. Челябинск, 1976г.).

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 21 опубликованной работе, среди которых 5 авт. свидетельств и 7 зарубежных патентов.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 3<sup>х</sup> глав основного текста, общих выводов и заключения. Содержит 136 страниц машинописного текста, 74 рисунка, 1 таблицу, библиографию из 126 наименований и приложения на 19 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении на основе анализа отечественных и зарубежных работ в области проектирования высококачественных систем управления упругими сложными механическими объектами выявляется современное состояние рассматриваемой проблемы и формируются задачи настоящей работы. Отмечается большой вклад, внесенный в разработку рассматриваемых вопросов советскими учеными - Поповым Б.П., Бесекерским В.А., Ахметжановым А.А., Скрипником Ю.А., Хлыпало Е.И., Шзровым С.Н. и др., а также рядом зарубежных авторов.

Первая глава настоящей работы посвящена синтезу и исследованию полосовых корректирующих устройств оказывающих демпфирующее воздействие на системы автоматического управления (САУ) упругими механическими объектами с ограниченными величинами жесткости и значительными моментами инерции конструкции, возможно меняющимися в процессе управления. Перед корректирующими устройствами поставлена задача

формирования желаемой формы выходных сигналов разомкнутых САУ при известном сигнале на входе в виде нормального белого шума. В качестве характеристики выходных сигналов выбрана спектральная плотность, такой выбор обуславливает линеаризованный вид систем управления, либо нормализующие свойства их конечных каскадов.

Спектральная плотность  $\xi_A(\omega)$  располагаемого выходного процесса  $\xi(t)$  разомкнутой системы управления упругим объектом и ее разложение на аддитивные составляющие представлены на рис. I Согласно рисунку

$$\xi(t) = x(t) + \xi_A(t) + \nu(t). \quad (I)$$

Сосредоточенная помеха, обуславливаемая резонансными свойствами системы, при выполнении неравенства:  $\omega_p \gg \Delta\omega$  (рис. I), т.е. достаточной узкополосности, определяется квазигармонической флуктуацией, случайно модулированной, в общем случае, по амплитуде, частоте и фазе:

$$\xi_A(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \Psi(t)] : \quad (2)$$

$$\Psi(t) = \varphi(\nu) + \int_0^t (\omega_p - \omega_0) d\tau, \quad (3)$$

здесь  $\omega_0$  - среднее значение случайной частоты резонанса.

Задача корректирующего устройства, формирующего желаемый выходной сигнал разомкнутой САУ, в рассматриваемом случае сводится к оптимальной фильтрации информационного сигнала  $x(t)$  из аддитивной смеси (I). Необходимая точность обеспечивается синтезом многомерного алгоритма фильтрации вектора  $\bar{\lambda}_t = \{x(t), A(t), \Psi(t), \omega_p(t)\}$ . Марковские, в общем случае многомерные, модели информационного и сопровождающих параметров полезного сигнала  $S(t, \bar{\lambda}_t) = x(t) + \xi_A(t)$ , нелинейная зависимость  $S(t, \bar{\lambda}_t)$  от параметров сосредоточенной помехи, многокомпонентность фильтруемого процесса  $\bar{\lambda}_t$  обуславливают выбор теории нелинейной фильтрации, а точнее - направления теории, разработанного Стратоловичем Р.Л., в качестве основы методики синтеза корректирующего устройства.

В работе выбраны одномерные марковские модели компонент сосредоточенной помехи:

$$\dot{\lambda}_\mu = a_\mu(\bar{\lambda}_t) + \eta_\mu, \quad \langle \eta_\mu(t_1), \eta_\nu(t_2) \rangle = \frac{1}{2} N_{\mu\nu} \delta(t_2 - t_1), \quad (.)$$

где  $\mu, \nu = A, \Psi, \omega_p$ .

Показана справедливость такого описания для параметров  $\xi_A(t)$ . Алгоритм оптимальной фильтрации реализован для одномерной и многомерной

марковских моделей желаемого выходного процесса САУ  $x(t)$  и, в соответствии с известными уравнениями квазилинейной фильтрации, определяется системой вида:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\lambda}_{\mu}^* &= a_{\mu}(\bar{\lambda}_t^*) + \sum_{j=x, A, \psi, \omega, p} K_{\mu j}^* \frac{\partial F(t, \bar{\lambda}_t^*)}{\partial \lambda_j^*}; \\ \dot{K}_{\mu\nu}^* &= \frac{1}{2} N_{\mu\nu}(\bar{\lambda}_t^*) + \sum_{i=x, A, \psi, \omega, p} K_{i\nu}^* \frac{\partial a_{\mu}(\bar{\lambda}_t^*)}{\partial \lambda_i^*} + \\ &+ \sum_{i=x, A, \psi, \omega, p} K_{\mu i}^* \frac{\partial a_{\nu}(\bar{\lambda}_t^*)}{\partial \lambda_i^*} + \sum_{ij=x, A, \psi, \omega, p} K_{\mu i}^* K_{j\nu}^* \frac{\partial^2 F(t, \bar{\lambda}_t^*)}{\partial \lambda_i^* \partial \lambda_j^*}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где

$\lambda_{\mu}^*$  - оценочные значения компонент фильтруемого вектора  $\bar{\lambda}_t$ , соответствующие максимуму его апостериорного распределения,

$K_{\mu\mu}^*$  - апостериорная дисперсия компоненты  $\lambda_{\mu}$ , характеризующая среднеквадратическую погрешность фильтрации.

На рис.2 приведен стационарный вариант структурной схемы оптимального корректирующего устройства (5,6), формирующего желаемый выходной сигнал САУ. Переход к стационарному варианту схемы корректен при больших значениях отношения  $\rho$  ( $\rho$  = сигнал/шум). Порядок передаточной функции информационного канала корректирующего устройства (рис.2) определяется порядком многомерной марковской модели информационного процесса  $x(t)$ .

Представление сосредоточенной помехи  $\xi_A(t)$  в виде моногармонического случайного процесса (2) соответствует частному случаю задачи коррекции. В настоящей работе рассмотрен также более общий случай, показавший справедливость предложенной методики синтеза при условии конечной ширины спектра помехи  $\xi_A(t)$ .

Структурная схема оптимального корректирующего устройства значительно упрощается при более узкой задаче коррекции, заключающейся в подавлении узкополосной помехи  $\xi_A(t)$  в располагаемом выходном сигнале корректируемой САУ. При постоянном значении частоты резонанса моногармонический случайный процесс (2) может быть представлен в квадратурах:

$$\xi_A(t) = A_1(t) \cos \omega_0 t - A_2(t) \sin \omega_0 t, \quad (7)$$

где

$$A_1(t) = A(t) \cos \varphi(t), \quad A_2(t) = A(t) \sin \varphi(t).$$

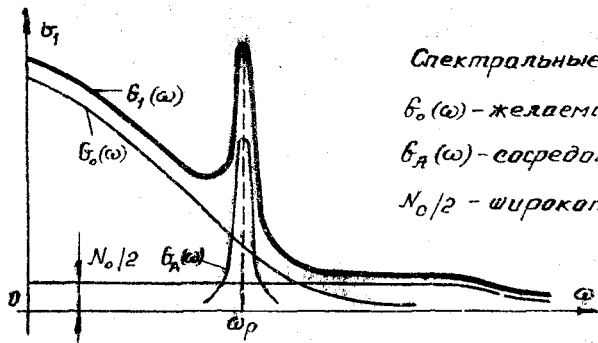


Рис. 1

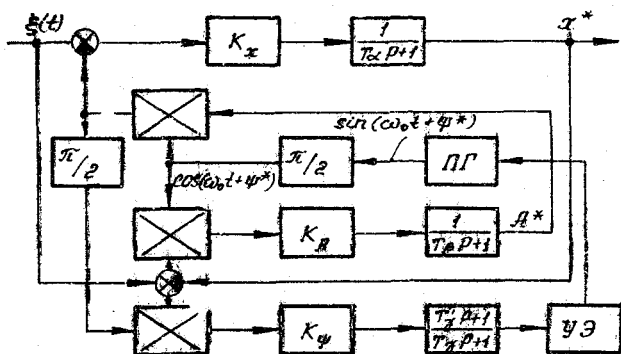


Рис. 2

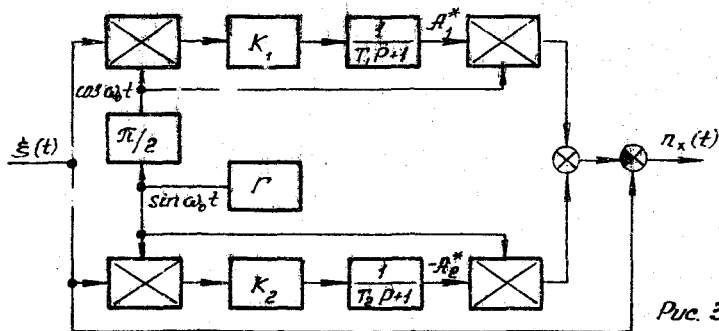


Рис. 3



Стационарная схема оптимального корректирующего устройства на основе квадратного фильтра, при условии одномерных марковских моделей квадратурных составляющих  $A_1(t)$ ,  $A_2(t)$  и равномерного распределения в широкой полосе частот желаемого выходного сигнала  $n_x(t)$  системы, показана на рис.3

В работе получена также структура оптимального корректирующего устройства, синтезированного на основе квадратного фильтра по замкнутой схеме. Особенность методики синтеза двумерного алгоритма фильтрации в данном случае - в зависимости наблюдаемого сигнала  $\xi(t)$  как от параметров фильтруемого процесса  $\xi_A(t)$ , так и от их оценочных значений:

$$\xi(t) = [A_1(t) - A_1^*(t)] \cos \omega_0 t - [A_2(t) - A_2^*(t)] \sin \omega_0 t + n_x(t). \quad (8)$$

Частотные характеристики корректирующих устройств на основе квадратного фильтра, полученные с помощью известного свойства частотного сдвига, аналитически подтверждают выполнение поставленной задачи коррекции.

Корректирующие свойства синтезированных оптимальных устройств исследованы методами цифрового и полунатурного моделирования. Рассмотренный пример цифровой модели характерной электрогидравлической системы управления упругим сложным механическим объектом, подтвердил эффективность демпфирующих свойств корректирующих фильтров, в том числе и для случаев, когда использование других средств коррекции практически безрезультатно.

Методом полунатурного моделирования осуществлено экспериментальное исследование предложенных корректирующих устройств на основе квадратного фильтра, принципиальная электрическая схема фильтра приведена в приложении к работе. Осциллограммы переходных процессов в моделях подтверждают эффективность использования разработанных корректирующих устройств для уменьшения или подавления колебательности, свойственной системам со слабодемпфированными звеньями и (или) увеличения запаса устойчивости.

Во второй главе диссертационной работы решена задача синтеза оптимальной структуры подсистем индикации угла с фазовым методом передачи информации - наиболее эффективным, как показала практика. В работе отмечена целесообразность использования в подсистемах индукционного типа датчиков. На основе анализа работы подсистем выделены составляющие их аддитивной погрешности, определяющей точность преобразования угла: собственная погрешность фазовращателей (ФВ),

фазовая неидентичность каналов преобразования, небаланс фазового детектора; отмечена зависимость линейности характеристик подсистем от диапазона преобразуемых углов.

Перед синтезируемой структурой подсистемы индикации угла в настоящей работе поставлена задача оптимальной фильтрации информационного сигнала из смеси его с фазовыми погрешностями и шумами элементов. Задача оптимального синтеза решена на основе предложенного в работе способа периодического преобразования структуры датчика подсистемы, обеспечивающего преобразование угла поворота в модулированную по выбираемому закону фазу переменного напряжения. Периодическое преобразование структуры датчиков осуществляется коммутатором, управляемым от генератора модулирующей частоты (рис.4). В двухфазном индукционном фазовращателе с переменной структурой (рис.4а) коммутатор осуществляет периодическое переключение квадратурных выходных напряжений ФВ или (и) периодическое инвертирование одного из них относительно электрических входов СКПТ. Выходной сигнал двухполюсного датчика:

$$U_{\text{вых}} = U_0 \sin[\omega t - \alpha M_{\varphi}(t) + \varphi_0]. \quad (9)$$

где  $M_{\varphi}(t) = \text{sign} \sin \Omega t$ ,  $\Omega$  - частота коммутации,

$\varphi_0$  - постоянный фазовый сдвиг, определяемый структурой датчика.

Выходной сигнал многополюсного индукционного датчика типа индуктосин:

$$U_{\text{вых}} = U_0 \sin[\omega t - \alpha P M_{\varphi}(t) + \varphi_{\text{оп}}]. \quad (10)$$

где  $P$  - число пар полюсов,

$\varphi_{\text{оп}}$  - постоянный фазовый сдвиг.

В однофазных индукционных фазовращателях с переменной структурой (рис.4б) коммутатор осуществляет периодическое переключение статорных выходных напряжений СКПТ или (и) периодическое инвертирование одного из них относительно входов ФВ. Фазомодулированный выходной сигнал датчика описывается уравнением (9).

Проведенные в настоящей работе исследования показали, что периодические преобразования структуры обеспечили индифферентность индукционных фазовращателей к неидеальности источника питания и большей части технологических погрешностей СКПТ. Результаты исследований позволили корректно задавать допустимый диапазон изменения параметров фазовращателей с переменной структурой, строго ограничивая нестабильность тех параметров, влияние которых на точность

работы ФВ слабо компенсируется преобразованиями структуры.

Анализ переходных режимов в однофазном и двухфазном датчиках показал прямую зависимость интенсивностей интерференционных погрешностей, обуславливаемых непрерывной коммутацией гармонических сигналов и неточной работой коммутатора от величины соотношения частот коммутации и несущей ( $\Omega/\omega$ ). Снизу величину частоты коммутации ограничивают интенсивности динамических погрешностей, причина которых в динамическом изменении входных сигналов датчиков.

Широкие возможности выбора частоты коммутации обеспечивают ограничения в допустимых пределах коммутационных погрешностей датчиков.

На основании проведенных исследований предварительно усиленный выходной сигнал  $\xi(t)$  фазовращателя с переменной структурой представлен в виде аддитивной смеси фазомодулированного полезного сигнала с помехами:

$$\xi(t) = U_0 \sin[\omega t - \alpha M_{\varphi}(t) + \varphi(t) + \varphi_0] + B(t)M_c(t) + n_0(t), \quad (II)$$

где  $B(t)M_c(t)$  - интерференционная помеха с модулирующей функцией  $M_c(t)$  и случайной амплитудой  $B(t)$ ,

$n_0(t)$  - внутренний шум ФВ и последвключенного усилителя,

$\varphi(t)$  - фазовая погрешность ФВ и усилителя.

Нелинейная зависимость полезной составляющей выходного сигнала  $\xi(t)$  датчика (II) от информационного параметра определяет выбор теории нелинейной фильтрации в качестве метода решения поставленной задачи синтеза оптимальной структуры подсистемы индикации угла поворота. Задача оптимальной фильтрации информационного процесса  $\alpha(t)$  из доступных измерению реализаций  $\xi(t)$  решена на основе известных априорных сведений об информационном, сопровождающих параметрах и помехах. В работе процесс  $\alpha(t)$ , сопровождающая фаза  $\varphi(t)$  и амплитуда  $B(t)$  помехи описаны одномерными марковскими моделями вида (4). Ограничение порядка моделей случайных процессов не является принципиальным, как уже отмечалось выше, но позволяет значительно упростить задачу синтеза. Оценка  $\alpha^*(t)$ , соответствующая максимуму апостериорного распределения информационного процесса  $\alpha(t)$ , при больших отношениях  $\rho$  является несмещенной, эффективной и находится из уравнений квазилинейного алгоритма фильтрации (5) при условии:  $\bar{\lambda}_t = \{\alpha(t), \varphi(t), B(t)\}$ . Принципиальных трудностей при синтезе стационарного варианта оптимальной структуры подсистемы индикации угла не возникает, схема отличается минимальной

среднеквадратической ошибкой фильтрации, находящейся в прямой пропорциональной зависимости от соотношения частоты и повышенной точностью преобразования угла поворота. Усложнение схемы по сравнению с известными вполне оправдано сложностью поставленной задачи синтеза

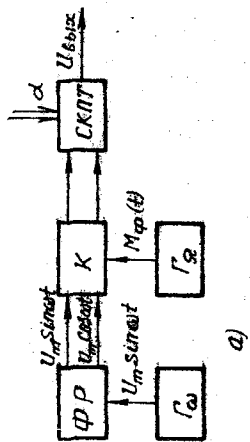
Оптимальный выбор частоты коммутации позволяет пренебречь интерференционной помехой, не увеличивая ошибки фильтрации сообщения. Упрощенная структурная схема оптимальной подсистемы индикации угла приведена на рис.5. В схеме: МУ - множительные элементы, ФСЦ - фазосдвигающая цепь, СУ - суммирующее устройство. Линейность и точность характеристики "ход - выход" подтвердил проведенный анализ работы подсистемы. Периодические преобразования структуры датчика привели к статистической независимости каналов преобразования информации. Т.о. разработанная структура подсистемы индикации удовлетворяет поставленной задаче синтеза, преимущество ее перед известными схемами очевидно и обусловлено введением нелинейной корректирующей связи, обеспечивающей сравнение измеряемого сигнала с его оценкой.

В реферируемой работе решена также задача синтеза оптимальной структуры следящих систем с учетом нелинейных характеристик и шумов датчиков обратной связи. Решением задачи синтеза явился оптимальный выбор структуры прямого канала системы, обеспечивающего при заданном датчике обратной связи оптимальное отслеживание выходным сигналом задающего воздействия. Синтез оптимальной схемы системы, с фазовращателем с переменной структурой в качестве датчика обратной связи (ДОС), осуществлен на основе теории нелинейной фильтрации Стратоновича Р.Д. Особенности уравнений нелинейной фильтрации обусловлены замкнутым характером синтезируемой структуры, в результате чего наблюдаемый процесс  $\xi(t)$  на выходе датчика обратной связи является функцией как задающего воздействия системы - информационного процесса  $\alpha(t)$ , так и его оценки  $\alpha^*(t)$ , оптимальное формирование которой задача разрабатываемой системы:

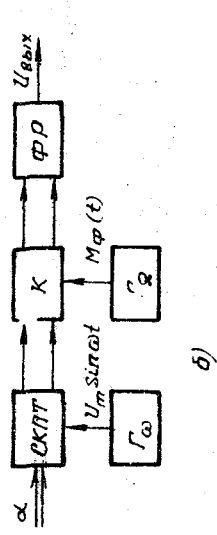
$$\xi(t) = u_0 \sin\{\omega t - [\alpha(t) - \varepsilon(t)] M_\phi(t) + \varphi(t) + \varphi_0\} + n_0(t), \quad (12)$$

где 
$$\varepsilon(t) = \alpha(t) - \alpha^*(t). \quad (13)$$

Регулятор синтезированной системы имеет двухканальную структуру. Один из каналов формирует оптимальную оценку задающего воздействия, а второй - оценку сопровождающего параметра, используемого как корректирующий сигнал системы. Периодическое преобразование структуры ДОС привело к статистической независимости каналов регулятора, что обеспечило уменьшение текущей ошибки и повышение качества процесса



а)



б)

Рис. 4. СКЛП - синусно-квантовый лаварантный параметризатор;  
 К - коммутатор;  $\Gamma_{\Omega}$  - генератор модулирующей частоты;  
 ФР - фазорасщепитель;  $\Gamma_{\omega}$  - генератор несущей частоты.

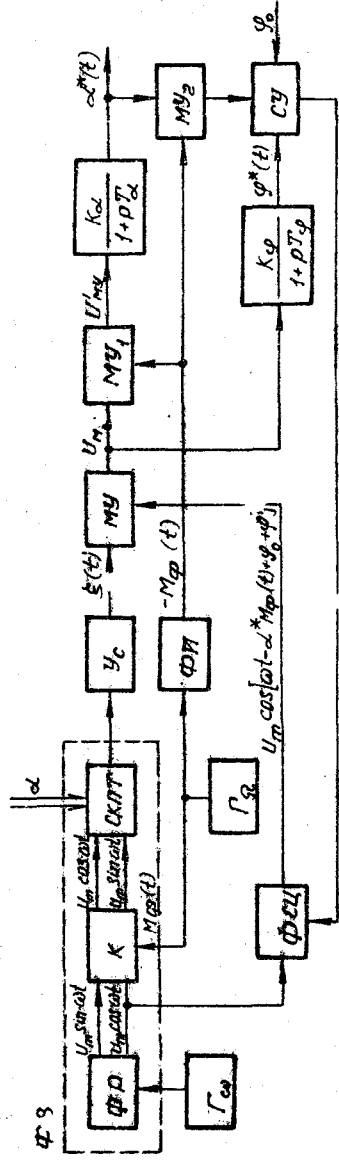


Рис. 5

слежения при неизменном объеме априорной и апостериорной информации.

В третьей главе работы предложена методика синтеза и разработана структура корректирующей связи, компенсирующей случайный момент сухого трения в системах управления. В работе отмечено, что сухое трение, присущее механическим звеньям систем, в значительной мере определяет качество и точность процессов управления. Искажения сигналов, автоколебания, неустойчивость при работе в диапазоне малых (ползучих) скоростей – все это результаты присутствия сухого трения. Приводимый во введении аналитический обзор говорит о серьезном внимании, уделяемом решению задачи компенсации трения. Однако, при постановке задачи компенсации не учитывался случайный характер момента сухого трения, между тем исследования говорят о существенном разбросе его параметров.

В настоящей работе для компенсации момента трения  $M_c(\Omega, \bar{\lambda})$ , определяемого нелинейной функцией от угловой скорости вращения  $\Omega$  и случайного вектора параметров  $\bar{\lambda}$ , использована оценка момента  $M_c^*(\Omega, \bar{\lambda}^*)$ , формируемая каналом компенсации. Канал компенсации трения в механической части  $W_0(P)$  систем включает систему оценки (СО) и датчик момента  $W_m(P)$  (рис.6). Выходной сигнал датчика  $\xi(t)$  представляет аддитивную смесь полезного сигнала и шума:

$$\xi(t) = \Delta M_c(\Omega, \bar{\lambda}, \bar{\lambda}^*) + n(t). \quad (14)$$

$$\Delta M_c(\Omega, \bar{\lambda}, \bar{\lambda}^*) = M_c(\Omega, \bar{\lambda}) - M_c^*(\Omega, \bar{\lambda}^*); \quad (15)$$

где  $\bar{\lambda}_\mu^*$  – оценочные значения компонент случайного вектора  $\bar{\lambda}$ . Нелинейный характер зависимости полезного сигнала от компонент информационного вектора  $\bar{\lambda}$  определяет выбор теории нелинейной фильтрации в качестве основы методики синтеза структуры системы оценки. Многомерный алгоритм фильтрации вектора  $\bar{\lambda}$  определяется из (5) с учетом того, что момент трения  $M_c(\Omega, \bar{\lambda})$  – случайная по включению функция, с параметрами, меняющимися в моменты переключения скорости ( $\Omega = 0$ ) и стационарными на полупериоде изменения  $\Omega$ . Выходной сигнал системы оценки

$$M_c^*(\Omega, \bar{\lambda}^*) = \begin{cases} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt & \text{при } \Omega < 0 \vee (\Omega = 0 \wedge \Delta\theta < 0), \\ \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt & \text{при } \Omega > 0 \vee (\Omega = 0 \wedge \Delta\theta > 0), \\ 0 & \text{при } \Omega = 0 \wedge \Delta\theta = 0, \end{cases} \quad (16)$$

$T$  – период наблюдения.

Начальные моменты  $M_{0i}$  определяются максимумом априорного распределения момента трения для двух направлений движения, либо, при отсутствии априорной информации, значениями параметров момента трения, соответствующими максимуму функционала  $F$  (6) в моменты переключения скорости. Структурная схема механической части систем (рис. 6) с компенсацией сухого трения согласно уравнению оптимальной фильтрации (16) представлена на рис. 7. Оптимальная схема компенсации — нестационарная, с постоянной времени  $T$ , увеличивающейся с течением времени наблюдения, ведущим отсчет от момента переключения скорости.

Случайный характер момента сухого трения в механических звеньях определяет случайные изменения динамических показателей системы. Широкий скоростной диапазон работы, необходимый в высокоточных следящих системах, увеличивает вероятность работы привода в зоне отрицательного механического сопротивления. Сравнительный анализ структурной устойчивости и динамических свойств систем с сухим трением в приводе показал, что в системах с оптимальной компенсацией трения согласно предложенному методу вероятность структурной устойчивости и параметры периодического режима определяются не только собственными параметрами привода, но и легко варьруемыми параметрами корректирующей связи. Математическое ожидание амплитуды периодического режима при нормальном законе распределения момента трения, равно нулю. Вероятность структурной устойчивости систем без компенсации трения и параметры периодического режима в системах без компенсации или с динамической компенсацией трения — наиболее эффективно из известных способу компенсации — находятся в жесткой зависимости от характеристик привода.

Из результатов проведенных исследований очевидно, что синтезированная оптимальная корректирующая связь наиболее полно решает задачу компенсации сухого трения, не только обеспечивая минимальную статическую погрешность системы, но и улучшая ее динамические характеристики.

Исследования процессов в механических звеньях систем с компенсацией сухого трения осуществлены методом цифрового моделирования. Оригинальными моментами разработанного алгоритма решения задачи исследования являются реализация периодического сброса на интеграторе и описание нестационарного параметра  $T$  компенсирующей связи. Исследования цифровой статистической модели привода подтвердили эффективность предложенной оптимальной схемы компенсации для общего

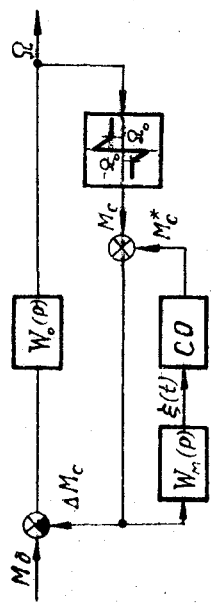
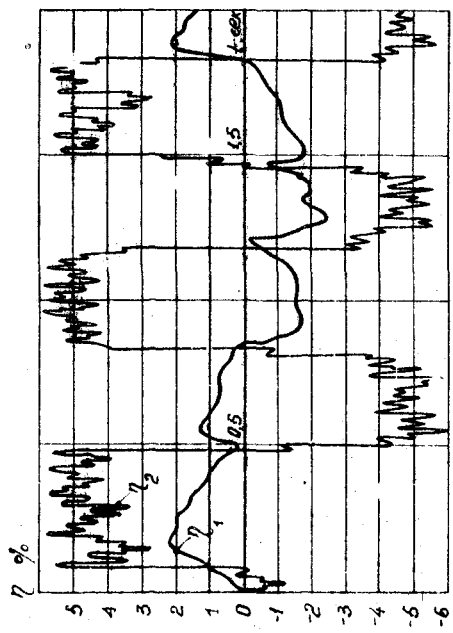
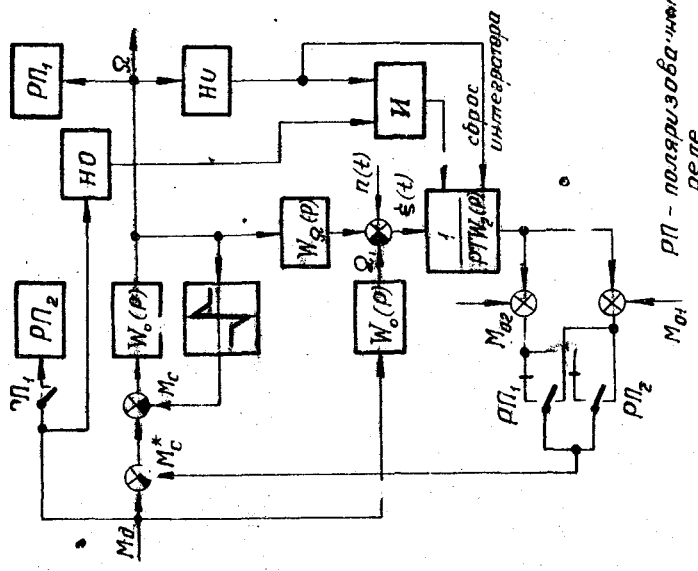


Рис. 6



$\eta_1$  - погрешность разработанной оптимальной системы;  
 $\eta_2$  - погрешность системы с динамической компенсацией

Рис. 8



PI - пьезоэлектрические реле  
 HO - нулевой орган  
 $W_\Omega(p)$  - передаточная функция датчика скорости.

Рис. 7



случая работы привода: при наличии шумов датчика компенсирующей связи и случайном характере момента трения. Преимущество предлагаемой схемы очевидно из сравнения кривых  $\eta$  относительной погрешности компенсации, представленных на рис.8.

В приложениях к диссертационной работе приводятся принципиальные схемы разработанных корректирующих устройств, реализованная на ЦВМ "М-222" программа исследования сложной электромеханической системы с коррекцией предложенного вида, акт внедрения, отзыв о промышленном использовании и патентные грамоты на разработанные устройства.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Для систем автоматического управления с резонансными свойствами и случайными величинами коэффициента демпфирования и частоты резонанса целесообразно применение предложенной методики синтеза реализованного на ее основе нелинейного оптимального корректирующего устройства с фильтром нижних частот в прямом канале и генератором опорных напряжений в канале обратной связи. Эффективность и простота реализации предложенной коррекции доказаны результатами использования в резонансных САУ узкополосных корректирующих устройств, синтезированных на основе квадратурного фильтра
2. Способ периодической модуляции полезной составляющей фазы выходного напряжения индукционных датчиков обеспечивает независимость точности работы подсистем индикации угла от собственных погрешностей фазовращателей, фазовой неидентичности каналов преобразования, шумов детектора.
3. Периодические преобразования в структурах индукционных фазовращателей, приводящие к коммутации статорных напряжений датчика относительно зажимов фазорасщепителя, компенсируют влияние на точность работы ФВ неидеальности источника питания и ряда технологических погрешностей.
4. Оптимальные схемы подсистем индикации угла с периодическими преобразованиями в структурах датчиков отличаются введением нелинейных корректирующих обратных связей по информационному сигналу. Периодические преобразования приводят к статистической независимости каналов подсистем и таким образом значительно повышают точность фильтрации информационного сигнала.
5. Как показал анализ синтезированной оптимальной схемы замкнутой следящей системы с датчиком обратной связи на основе фазовраща-

теля с переменной структурой, малая текущая ошибка слежения обеспечивается синтезом двухканальной структуры прямой цепи системы.

6. Методика синтеза и реализованная на ее основе структура оптимальной компенсирующей связи, включающей модель механического звена без трения и изодромное звено, наиболее полно решают задачу компенсации случайного момента сухого трения в механических звеньях систем с широким скоростным диапазоном работы, обеспечивая минимальную статическую погрешность системы и одновременно улучшая ее динамические характеристики.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами основные результаты и рекомендации настоящей работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. На основе теории нелинейной фильтрации разработана методика синтеза лосовых корректирующих устройств с демпфирующими свойствами, формирующих желаемый выходной сигнал САУ по известной спектральной плотности наблюдаемого выходного процесса. Методика эффективна для широкого класса линеаризованных систем или систем с нормализующим выходным каскадом.
2. Для систем с резонансными свойствами согласно предложенной методике разработаны структурные схемы корректирующих устройств:
  1. Нелинейного оптимального фильтра - для систем со случайными величинами коэффициента демпфирования и резонансной частоты,
  2. Узкополосных корректирующих устройств на основе квадратурного фильтра - для систем с постоянной частотой резонанса. Демпфирующие фазосперечающие свойства разработанных устройств подтверждаются полученными частотными характеристиками и результатами цифрового и полунатурного моделирования.
3. Предложен способ периодического преобразования структуры индукционных фазовращателей - осуществляемый коммутацией статорных напряжений датчика относительно зажимов фазорасщепителя - в качестве метода повышения точности подсистем индикации угла и следящих систем, использующих фазовращатели.
4. Разработаны схемы индукционных фазовращателей с переменной структурой и фазомодулированным выходным напряжением на основе способа периодической коммутации. Точность преобразования ФЧ не за-

висит от ряда технологических погрешностей и неидеальности зачитываемого напряжения. Теоретические разработки подтверждены результатами заводских испытаний опытного образца измерительного блока на основе разработанного датчика.

5. На основе теории нелинейной фильтрации и способа периодической коммутации разработаны:
  1. Оптимальная структурная схема подсистемы индикации угла с разработанным индукционным датчиком, отличающаяся повышенной точностью и линейностью преобразования,
  2. Оптимальная с точки зрения точности схема следящей системы с датчиком обратной связи с переменной структурой.
6. Предложена методика синтеза и на ее основе разработана структура оптимальной связи, компенсирующей случайный момент сухого трения в механических звеньях систем управления с широким скоростным диапазоном работы. Разработан алгоритм решения задачи исследования компенсирующей связи, реализованный на входном языке транслятора ТА-ІМ ЦВМ "М-222".
7. Разработанные методики синтеза и реализованные на их основе структурные схемы устройств использованы при проектировании систем управления сложными механическими объектами и находятся на разной стадии промышленного внедрения:
  1. Методики синтеза, разработанные структурные схемы узкополосных корректирующих устройств и компенсирующей сухое трение связи - внедрены в испытательном оборудовании,
  2. Индукционный фазовращатель с переменной структурой - использован в опытном образце измерительного блока фазоимпульсной системы числового программного управления и успешно прошел заводские испытания.

Свойства разработанных методик и реализованных устройств говорят о возможности их эффективного использования не только в системах управления упругими механическими объектами, но и при проектировании систем управления и фазоизмерительных устройств других классов.

Основное содержание диссертации опубликовано  
автором в следующих работах:

1. Синтез узкополосного нелинейного корректирующего фильтра системы автоматического управления по заданной спектральной плотности мощности. - "Изв. ВУЗов. Приборостроение", 1975, № 10 (соавтор Жабреев В.С.).
2. Синтез узкополосного корректирующего устройства для системы автоматического управления. В учебн. пособии "Информационные системы" Под ред. Г.С.Черноруцкого и В.С.Жабреева. Изд. Челяб. политехн. ин-та, 1977.
3. Синтез следящей системы с фазовращателями. В сб. тр. "Вопросы динамики систем автоматического управления", № 153. Изд. Челяб. политехн. ин-та, 1974.
4. Синтез стохастической фазовой следящей системы на основе теории нелинейной фильтрации. Тр. I Всесоюз. конф. "Стохастические системы управления". Челябинск, 1976.
5. Способ преобразования угла поворота в фазу переменного напряжения. Авт. свид. № 362577. Бюлл. изобрет., 1974, № 14 (соавторы Крепышев Г.Б., Смолин В.И., Соболевский А.С.).
6. Фазовая следящая система. Авт. свид. № 317041. Бюлл. изобрет., 1971, № 30 (соавторы Л.5).
7. Фазовращатель. Авт. свид. № 361735. Бюлл. изобрет., 1974, № 14 (соавторы Л.5).
8. Преобразователь углового положения вала в напряжение. Авт. свид. № 548762. Бюлл. изобрет., 1977, № 8 (соавтор Жабреев В.С.).
9. Анализ системы с переменной структурой. В сб. тр. "Вопросы динамики систем автоматического управления" № 153, Изд. Челяб. политехн. ин-та, 1974.
10. Синтез следящей системы с коммутируемым фазовращателем. В учебн. пособии "Синтез квазиоптимальных нелинейных замкнутых следящих систем". Под ред. Г.С.Черноруцкого и В.С.Жабреева. Изд. Челяб. политехн. ин-та, 1977.
11. Компенсация сухого трения в автоматических системах. - "Изв. АН СССР. Техническая кибернетика", 1976, № 6 (соавторы Черноруцкий Г.С., Жабреев В.С.).
12. Цифровое моделирование некоторых схем компенсации сухого трения. - "Изв. ВУЗов. Электромеханика", 1977, № 5, (соавтор Жабреев В.С.).

13. Поворотное соединение труб. Авт. свид. № 498443. Бюлл. изобрет., 1976, № I (соавтор Петренко П.И.).

14. Цифровое моделирование канала компенсации сухого трения. В учебн. пособ. Л.ИО.

15. An apparatus for converting an angle of rotation to an A.C. voltage phase. Патент Англии № 1364005, 1974 (соавторы Крепышев Г.Б., Смолин В.И., Соболевский А.С.).

16. Dispositif pour la conversion de l'angle de rotation d'un arbre en phase de tension alternative, et dispositif d'asservissement en phase en comportant application. Патент Франции № 7232220, 1976, (соавторы Л.И5).

17. Dispositif de conversion de l'angle de rotation d'un arbre, et systeme d'asservissement en phase utilisant ce dispositif. Патент Бельгии № 788.133, 1973 (соавторы Л.И5).

18. Einrichtung zur Umformung des Wellendrehwinkels in eine Wechselspannungsphase. Патент ФРГ № 2239941, 1976 (соавторы Л.И5).

19. Einrichtung zur Umformung eines Wellendrehwinkels i eine Wechselspannungsphase und Phasen-Folgesystem. Патент ГДР № 99239, 1973 (соавторы Л.И5).

20. Phasen-Folgesystem. Патент ФРГ № 2264892, 1976 (соавторы Л.И5).

21. Zarizeni pro premenu uhlu natoceni hridlele' ve fazi stri-daveho napeti. Патент Чехословакии № 161361, 1975 (соавторы Л.И5).