

01.02.06  
Н 309

На правах рукописи

КАЦАЙ Дмитрий Алексеевич

РАЗРАБОТКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА  
БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРИЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ  
НА ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОМ ГИРОСКОПЕ

Специальности: 01.02.06 - "Динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры"  
05.11.03 - "Гироскопы, навигационные приборы  
и комплексы"

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1995

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Лысов А.Н.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Павлюк Ю.С.;

кандидат технических наук Гохфельд В.Д..

Ведущая организация: научно - производственное объединение  
электромеханики, г.Миасс

Зашита состоится "17" января 1996 г., в 15 часов на заседании  
диссертационного совета Д.053.13.01 при Челябинском государствен-  
ном техническом университете по адресу 454080, г.Челябинск,  
пр.им.В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_ 1995 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент

*М.А.Кононов*

В.М.Кононов

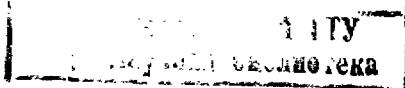
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ.** Развитие современной космической техники требует совершенствования систем управления летательными аппаратами с целью обеспечения требуемой точности ориентации в выбранной системе координат. Наиболее перспективными являются бесплатформенные системы ориентации (БСО), имеющие меньший вес и энергопотребление и больший срок службы по сравнению с платформенными системами.

Основным показателем, определяющим структуру алгоритма функционирования БСО и ее элементов, является заданная точность определения ориентации, обеспечивающая требуемую точность навигации. Свойства элементов, отобранных для построения системы, отражаются на структуре системы и алгоритме ее работы. Справедливо и обратное утверждение. Системные требования определяют тип пригодного чувствительного элемента. Так как БСО разрабатываются для конкретного объекта, то отсутствует объект по ГОСТу, а следовательно отсутствует и базовый образец системы.

Для рассматриваемой области техники – космических летательных аппаратов – наиболее подходящими являются динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) вследствие высокой надежности, длительного срока службы.

Необходимость исследования динамических свойств ДНГ и построения на его базе высокоточного датчика угловой скорости (ДУС) записана в решениях Всесоюзных конференций, посвященных памяти Н.Н.Острикова, проводимых в г.Ленинграде в НПО "Азимут" в 1980, 1982, 1984, 1986 и 1988 г.г., а также на Всесоюзных конференциях в г.Москве в ИШ в 1985 г. и в МВТУ им.Баумана в 1986 г.. Актуальность этого вопроса отмечена на заседании секции по проблемам



динамики и управления космическими объектами АН СССР, проведенным в г. Миассе в мае 1989 года.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Совершенствование методов анализа и синтеза чувствительных элементов, разрабатываемых на базе динамически настраиваемых гироскопов.

**МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИИ.** Применяются аналитические и численные методы исследований. Уравнения движения ДНГ, состоящего из совокупности взаимосвязанных между собой твердых тел, выводятся из динамических уравнений Эйлера. Путем введения переменных состояния обеспечивается переход к уравнениям состояния ДНГ. Модель в форме уравнений состояния позволяет использовать методы теории линейных систем для последующего анализа и синтеза. Синтез обратной связи осуществляется в два этапа. На первом с помощью метода динамического программирования рассчитываются значения коэффициентов матрицы регулятора, обеспечивающие получение устойчивой точки в пространстве параметров регулятора для ротора ДНГ как объекта регулирования. Далее из полученной точки выполняется настройка параметров регулятора, обеспечивающая требуемые динамические свойства датчика. Проверка результатов синтеза проводится численными методами путем моделирования поведения датчика во временной и частотной областях.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** Научная новизна работы состоит в разработке теоретических основ для анализа и синтеза чувствительных элементов, построенных на базе динамически настраиваемых гироскопов. Новизна технических решений подтверждается авторскими свидетельствами, в которых защищены приоритеты на новые конструкции, полученные в результате теоретического анализа существующих схем ДНГ.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ

1. Получена математическая модель датчика угловой скорости с регулятором по состоянию и с наблюдающими устройствами Льюинбергера и Калмана.

2. Исследованы погрешности датчика угловой скорости со статическим и астатическим законами обратной связи. Показано, что предложенный датчик угловой скорости с интегральной обратной связью имеет улучшенные характеристики: в нем отсутствуют погрешности от углового ускорения в измерительном канале и меньший уровень погрешностей от угловых ускорений по перекрестной связи между измерительными каналами.

3. Предложена методика параметрического синтеза датчика угловой скорости, включающая в себя совокупность программ, структур файлов данных, с помощью которых проведен анализ динамических свойств, их синтез и осуществлено численное моделирование предлагаемого датчика в частотной и временной областях.

4. Получены модели погрешностей датчика угловой скорости от смещения нулей всех электронных устройств, стоящих в цепи обратной связи, для двух вариантов выходных сигналов: а) по токам в датчиках моментов; б) по напряжениям измерительного контура. Модели погрешностей позволяют исследовать влияние смещения нулей электронных устройств во всем частотном диапазоне информационного сигнала. На основании анализа моделей погрешностей сделан вывод о преимуществе выходного сигнала по току перед выходным сигналом по напряжению.

5. Предложенная методика анализа и синтеза, проверенная на динамической системе 6-го порядка, имеет самостоятельное значение в разработке динамических систем с помощью численно-аналитических методов.

РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ. В разработках научно - производственного объединения электромеханики (г. Миасс) использованы теоретические модели и рекомендации по разработке ДНГ на ДНГ. В учебном процессе Челябинского государственного технического университета используются учебные пособия /35, 36, 37/. Макет ДНГ - ДУСа, разработанный и изготовленный автором, используется в учебном процессе кафедры "Гироскопические приборы и устройства".

АПРОБАЦИЯ. Основные положения и выводы по работе докладывались на XII - XVI межотраслевых научно - технических конференциях памяти Н.Н. Острякова /Ленинград, 1980 - 1988/, на семинаре по динамически настраиваемым гироскопам в ИПМ АН СССР /Москва, 1985/, на конференциях Челябинского политехнического института /1980 - 1995/.

ПУБЛИКАЦИИ. По результатам диссертации соискателем лично и в соавторстве опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 учебных пособия, 4 авторских свидетельства, 2 научно - технических отчета.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основная часть изложена на 125 страницах машинописного текста и иллюстрируется рисунками на 20 листах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан обзор предшествующих работ по разработке ДНГ - ДУС. Первые сообщения о ДНГ появились в 60-е годы. Эти гироскопы стали рассматриваться как альтернативные поплавковым гироскопам. Особенностью ДНГ является то, что ротор гироскопа связан с помощью внутреннего упругого подвеса с валом приводного двигателя. Это избавляет его от основного источника погрешностей

в обычном гироскопе - сухого трения. С другой стороны отсутствие поддерживающей жидкости существенно упрощает его конструкцию по сравнению с поплавковым гироскопом.

Первоначально ДНГ разрабатывался как чувствительный элемент для построения индикаторных гироскопических стабилизаторов. Чтобы гироскоп был астатическим необходимо скомпенсировать моменты, возникающие в упругом подвесе при отклонении ротора. Такая компенсация возможна за счет динамических моментов, зависящих от геометрических размеров подвеса, ротора и скорости собственного вращения ротора. Условие, которому должны подчиняться параметры гироскопа, назвали условием динамической настройки, а класс таких приборов - динамически настраиваемыми гироскопами.

Фундаментальные работы, посвященные теоретическим основам функционирования ДНГ были опубликованы преимущественно советскими и американскими учеными, среди которых необходимо отметить труды Р.А.Абрамова, В.Б.Белугина, Л.И.Брзгуля, Ю.Б.Власова, А.В.Збруцкого, Р.И.Крейга, В.А.Матвеева, Л.З.Новикова, М.А.Павловского, Д.С.Пельпора, Е.Л.Смирнова, В.Г.Терешкина, О.М.Филанова.

ДНГ можно рассматривать как свободный гироскоп на ограниченном интервале времени, меньшем постоянной времени гироскопа. Угол отклонения гироскопа обычно не превышает 30 угловых минут. Следовательно такой гироскоп может применяться для построения системы ориентации в составе гиростабилизированной платформы.

С другой стороны ДНГ в режиме динамической настройки представляет собой датчик угловой скорости, который имеет большую постоянную времени переходных процессов и малый диапазон измеряемых угловых скоростей. Поскольку реальные угловые скорости космических летательных аппаратов превышают допустимые значения, измеряемые ДНГ, то необходимо разработать систему управления

движением ротора относительно корпуса гироскопа в виде обратной связи. Информацию о переносном угловом движении такого ДНГ можно получать, зная момент обратной связи, вызывающий прецессионное движение ротора в инерциальном пространстве с переносной угловой скоростью.

ДНГ является двухкомпонентным измерителем угловой скорости. Поэтому при решении задачи синтеза обратной связи необходимо получить регулятор, который бы обеспечивал необходимую полосу пропускания полезного сигнала и минимум перекрестных связей между измерительными каналами. При синтезе нельзя применять принцип автономности, так как это может привести к полному уничтожению гироскопических или инерционных моментов. Уничтожение гироскопических моментов лишает гироскоп его главного свойства - прецессии под действием внешних моментов - а следовательно снижению точности разрабатываемого датчика. Уничтожение инерционных моментов - обнуление коэффициентов при старших производных в уравнениях движения - выведет прибор на границу устойчивости и сделает его неработоспособным.

В первой главе проведен анализ динамически настраиваемого гироскопа как чувствительного элемента для построения датчика первичной информации. На этапе анализа ДНГ рассмотрены существующие кинематические схемы с целью выявления гироскопа с наибольшей полосой пропускания полезного сигнала в виде переносной угловой скорости и проведены доработки конструкций гироскопов, улучшающие их динамические свойства. Предложенные конструкции защищены авторскими свидетельствами.

Проведенный анализ конструкций ДНГ позволяет сделать вывод о целесообразности построения ДУС на базе ДНГ с симметричным двухколечным подвесом, изображенным на рис.1, или ДНГ с упругим

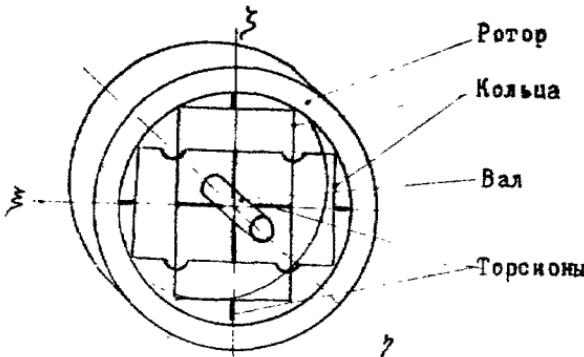


Рис.1. ДНГ с симметричным двухколечным подвесом.

валом. Расширение полосы пропускания однороторного ДНГ возможно за счет совмещения экваториальной оси ротора, ортогональной продольной оси упругих элементов, с осью вращения вала. Компенсация карданных погрешностей ДНГ с одноколечным подвесом осуществляется в схеме, содержащей два ротора, подвесы которых развернуты относительно друг друга в экваториальной плоскости на угол 45 градусов. Миниатюризация ДНГ и расширение его функциональных возможностей достигается в случае выполнения валом функций датчика сил.

С помощью динамических уравнений Эйлера получена математическая модель ДНГ в виде системы дифференциальных уравнений четвертого порядка:

$$\dot{x}_o' = A_o x_o + G_o \omega + B_o u, \quad (1)$$

где

$$A_o = \begin{bmatrix} -k_a & h & k_{\pi} & c_{\pi} \\ -h & -k_a & -c_{\pi} & -k_{\pi} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; G_o = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ -g_{12} & g_{11} \\ -g_2 & 0 \\ 0 & -g_2 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} k_{dm} & 0 \\ 0 & k_{dm} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; x_o = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix};$$

$$x_o' = \frac{dx_o}{dt} = \begin{bmatrix} x_1' \\ x_2' \\ x_3' \\ x_4' \end{bmatrix}; \quad x_i' = \frac{dx_i}{dt}, (i=1, \dots, 4); \quad \omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix}; \quad g_{11} = k_d g_2; \quad g_{12} = -hg_2 + g_1,$$

$$h = \frac{A+2b}{B+b} \cdot \Omega; \quad k_d = \frac{K_d}{\omega_c (B+b)}; \quad k_\pi = \frac{\epsilon_0}{2 \omega_c (B+b)}; \quad \epsilon_\pi = \frac{K_d \Omega}{2 \omega_c (B+b)};$$

$$g_1 = \frac{(A+a+b-c)\Omega \omega_{max}}{\omega_c^2 (B+b) \theta_{max}}; \quad g_2 = \frac{\omega_{max}}{\theta_{max}}; \quad k_{dm} = \frac{K_{dm} i_{max}}{\omega_c^2 (B+b) \theta_{max}}; \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix};$$

$$x_1 = \frac{1}{\omega_c \theta_{max}} \cdot \frac{da}{dt} + g_2 \omega_1, \quad x_2 = \frac{1}{\omega_c \theta_{max}} \cdot \frac{d\beta}{dt} + g_1 \omega_2,$$

$$x_3 = \frac{a}{\theta_{max}}; \quad x_4 = \frac{\beta}{\theta_{max}}; \quad t = \omega_c t - \text{безразмерное время};$$

A и B - осевой и экваториальный моменты инерции ротора;

a - осевой момент инерции кольца;

b, c - экваториальные моменты инерции кольца;

$\Omega$  - угловая скорость собственного вращения ротора;

$u_1, u_2$  - управление, формируемое контуром обратной связи;

$\theta_{max}$  - максимальный угол отклонения ротора, ограниченный упорами;

$\omega_c$  - характеристическая частота, на которой осуществляется обезразмеривание коэффициентов в уравнениях состояния;

$\omega_1 = \frac{\omega_1}{\omega_{max}}, \quad \omega_2 = \frac{\omega_2}{\omega_{max}}$  - относительные входные угловые скорости;

$\omega_{max}$  - максимальная входная угловая скорость.

Уравнения движения представлены также в специальной матричной форме, удобной для целей исследования погрешностей разрабатываемого датчика, обусловленных технологическими и динамическими погрешностями элементов цепей обратной связи.

По модели в пространстве состояний исследована управляемость и наблюдаемость датчика. Выполнение условий управляемости и наблюдаемости по Калману свидетельствует о возможности созда-

ния на базе ДНГ с гибким валом или с симметричным двухжолечным подвесом датчика угловой скорости с любыми динамическими характеристиками. Анализ критериев Калмана показывает, что они выполняются независимо от геометрических размеров гироскопа (в рамках линейной модели ДНГ), поскольку в значения отличных от нулей определителей не входят параметры ДНГ.

Во второй главе изложена методика структурно-параметрического синтеза датчика угловой скорости с требуемыми динамическими характеристиками.

ДНГ является динамической системой четвертого порядка. Для создания на его базе ДУС с требуемыми показателями качества достаточно использовать в обратной связи регулятор по состоянию. Такой регулятор в установившемся режиме измерения датчиком переносной угловой скорости приведет к отклонению ротора на постоянный угол, пропорциональный этой скорости. Проведенный анализ погрешностей ДНГ позволяет сделать вывод о появлении возмущающих моментов по осям его чувствительности из-за изгиба торсионов, расстройки и вязкого трения в подвесе. Уменьшение погрешностей можно обеспечить путем уменьшения угла отклонения ротора. Однако, при этом значительно возрастет коэффициент передачи обратной связи по углу, необходимый для создания уравновешивающего момента. Реализация обратной связи, обеспечивающей необходимую полосу пропускания измеряемой угловой скорости, может стать невозможной из-за насыщения усилителей. С целью устранения указанного недостатка предложено применить астатический закон регулирования угловых движений ротора.

На данном этапе разработки ДУС синтез регулятора решается как задача оптимальной стабилизации состояния  $x=0$  по квадратичному критерию качества. Такая постановка задачи позволяет полу-

чить решение в общем виде при многомерных линейных моделях объекта в отклонениях. Метод синтеза регулятора таким способом называется аналитическим конструированием регулятора (АКОР). Для синтеза ДУС методом АКОР необходимо иметь модель ДНГ в пространстве состояний с учетом интегрирующих звеньев в цепи обратной связи. С этой целью вводится расширенный вектор пространства состояний:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

где  $x_5 = \int_0^{\tau} x_3(\tau) d\tau$ ,  $x_6 = \int_0^{\tau} x_4(\tau) d\tau$ .

Модель ДНГ в этом случае будет иметь следующий вид:

$$x' = Ax + Bu + Gw, \quad (3)$$

где

$$x' = \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \\ x'_5 \\ x'_6 \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} -k_d & h & -k_n & 0 & 0 & 0 \\ -h & -k_d & -a_n & -k_n & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} k_{dm} & 0 \\ 0 & k_{dm} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ -g_{12} & g_{11} \\ -g_2 & 0 \\ 0 & -g_2 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix};$$

$$w = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix};$$

ДНГ с двухколечным подвесом или с гибким валом является стационарной линейной системой. Следовательно критерий оптимиза-

ции для такой системы может быть записан в виде:

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u) dt, \quad (4)$$

где  $Q$  и  $R$  - положительно-определенные размерами [6x6] и [2x2] матрицы.

Оптимальное управление является линейной функцией от переменных состояния и имеет вид

$$u = -R' B' K_x x, \quad (5)$$

где  $K_x$  - постоянная положительно-определенная матрица, определяемая из решения дифференциального матричного уравнения Риккати.

$$\dot{K}_x = -K_x A - A^T K_x + K_x B R^{-1} B^T K_x - Q. \quad (6)$$

Для получения решения уравнения (6) необходимо задать матрицы весовых коэффициентов  $Q$  и  $R$ . Нет рекомендаций, которые позволяли бы однозначно определить матрицы  $Q$  и  $R$  в соответствии с требуемыми показателями качества разрабатываемой системы. Поскольку переменные состояния приведены к относительным величинам, а матрицы  $Q$  и  $R$  должны быть положительно определенными, то можно выбрать их единичными матрицами четвертого и второго порядков.

Анализ результатов синтеза проводится по логарифмическим амплитудно-частотным характеристикам (ЛАЧХ) измерительных каналов ДУС и перекрестных связей между ними, представленных на рис.2. Цифрой 1 обозначена характеристика измерительного канала ДУС; цифрой 2 перекрестная связь между каналами. Цифрой 3 обозначена желаемая характеристика, представляющая собой ЛАЧХ апериодического звена с постоянной времени, соответствующей требуемой частоте среза  $\omega$ , датчика. Из графиков видно, что требуется дополнительная настройка коэффициентов регулятора с целью расшире-

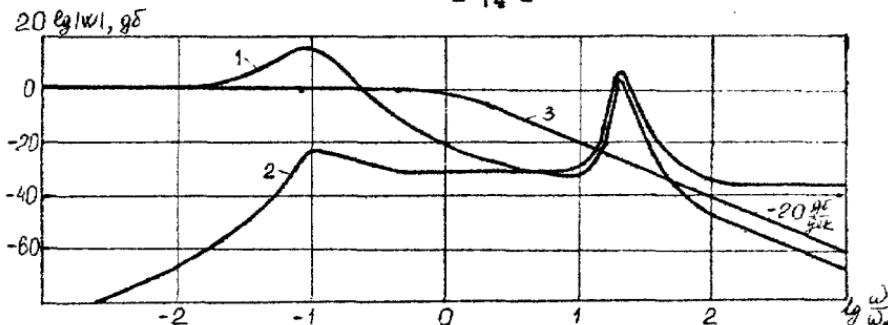


Рис.2. ЛАЧХ ДУС, синтезированного методом АКОР

ния полосы пропускания ДУС и подавления нутационного всплеска.

Задача настройки коэффициентов решается прямым модальным методом. Исходными данными для синтеза являются собственные значения матрицы состояния ДУС. Для выявления связи между расположением собственных значений и динамическими характеристиками ДУС находятся собственные значения матрицы состояния, содержащей коэффициенты регулятора, рассчитанные по интегральному квадратичному критерию. Анализ показывает, что для обеспечения желаемых динамических характеристик в ДУС необходимо обеспечить равенство двух собственных частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  требуемой частоте среза, а третью частоту  $\omega_3$  сделать близкой к нутационной частоте ДНГ. Для устранения резонансных пиков на частоте среза и нутационной частоте необходимо наложить ограничения в виде равенства на значения коэффициентов демпфирования на собственных частотах  $\xi_1 = 0.5$ , ( $i=1,2,3$ ): Вещественная часть собственных значений вычисляется по выражению:

$$R_i = -|\xi_i \omega_i|, \quad (i=1,2,3);$$

мнимая часть:

$$J_i = R_i^2 (1 - \xi_i^2) / \xi_i^2, \quad (i=1,2,3).$$

Синтез цепи обратной связи проведен на основании теоремы о

разделении в два этапа. На первом этапе синтезированы параметры регулятора в предположении о доступности значений всех переменных состояний. Использован интегральный квадратичный критерий качества переходного процесса. На втором этапе синтезировано наблюдаемое устройство для восстановления вектора переменных состояния. В условиях отсутствия помех предложено использовать редуцированное наблюдаемое устройство Льшинбергера второго порядка, восстанавливающее значение угловых скоростей ротора. Используя разделение обратной связи на два независимых контура можно уменьшить уровень помех, обусловленных высокочастотными колебаниями ротора. С этой целью в составе обратной связи выделен измерительный контур, в котором используются сигналы пропорциональные углам отклонения ротора и их интегралам, и демпфирующий контур, использующий значения угловых скоростей ротора и предназначенный для демпфирования его колебаний. ЛАЧХ измерительного контура представлены на рис.3, где 1 - характеристика измерительного канала ДУС; 2 - перекрестная связь между каналами, 3 - желаемая характеристика измерительного канала.

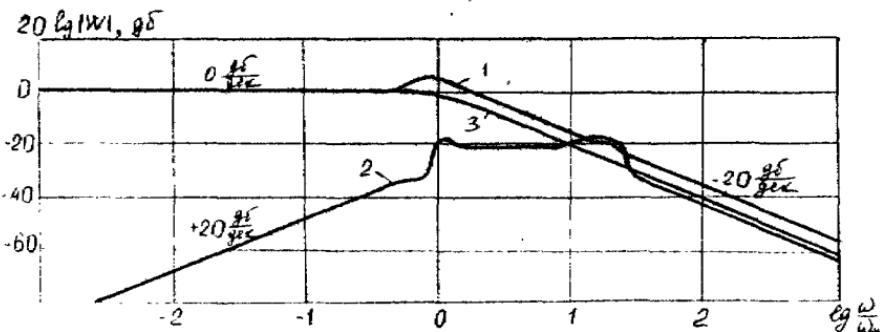


Рис.3. ЛАЧХ измерительного контура ДУС, синтезированного прямым модальным методом.

В условиях помех восстановление значений переменных состояния ведется с помощью наблюдаемых устройств Калмана - Бьюси. Минимальный порядок системы дифференциальных уравнений, описывающих работу наблюдателя, равен шести.

Рассмотрены инженерные методы синтеза регулятора, обеспечивающие наибольшее приближение динамических характеристик синтезируемого ДНГ к желаемым по полосе пропускания полезного сигнала и уровню перекрестных связей между измерительными каналами. Наибольшую эффективность показал прямой модальный метод.

В третьей главе рассматривается моделирование динамики датчика во временной области с целью проверки результатов синтеза.

В основу моделирования положены уравнения состояния (2)

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= (-k_d z_1 + h z_2 - k_{\Pi} z_3 + c_{\Pi} z_4 + g_{11} \omega_1 + g_{12} \omega_2 - k_{DM} i_1) \omega_c; \\ \dot{z}_2 &= (-h z_1 - k_d z_2 - c_{\Pi} z_3 - k_{\Pi} z_4 - g_{12} \omega_1 + g_{11} \omega_2 - k_{DM} i_2) \omega_o; \\ \dot{z}_3 &= (z_1 - g_2 \omega_1) \omega_o; \\ \dot{z}_4 &= (z_2 - g_2 \omega_2) \omega_c; \\ \dot{z}_5 &= z_3 \omega_o; \\ \dot{z}_6 &= z_4 \omega_c, \end{aligned} \right\}$$

где  $i_1$ ,  $i_2$  - суммарные токи измерительного и демпфирующего контуров, определяемые выражениями:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_{1I} + i_{1D}, \\ i_2 &= i_{2I} + i_{2D}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{1I} &= K_3 z_3 - K_4 z_4 + K_5 z_5 - K_6 z_6; \\ i_{2I} &= K_4 z_3 + K_3 z_4 + K_6 z_5 + K_5 z_6, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{1D} &= K_1 \hat{z}_1, \\ i_{2D} &= K_1 \hat{z}_2, \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$K_i$ , ( $i=1,6$ ) – коэффициенты регулятора.

Переменные  $\hat{z}_1$  и  $\hat{z}_2$  представляют собой восстановленные с помощью наблюдющего устройства значения относительных угловых скоростей ротора.

Уравнения, описывающие работу наблюдателя Льюинбергера:

$$\left. \begin{array}{l} \dot{z}_7 = [-L_1 z_7 + (h+L_2) z_8 + d_1 z_3 + d_2 z_4] \omega_c; \\ \dot{z}_8 = [-(h+L_2) z_7 - L_1 z_8 - d_2 z_3 + d_1 z_4] \omega_c; \\ \dot{\hat{z}}_1 = z_7 + L_1 z_3 - L_2 z_4; \\ \dot{\hat{z}}_2 = z_8 + L_2 z_3 + L_1 z_4. \end{array} \right\} \quad (11)$$

где  $L_1, L_2$  – собственные значения наблюдателя Льюинбергера.

Синтез параметров регулятора осуществлялся в предположении близинерционности датчиков углов и датчиков моментов. Фактически они являются динамическими звеньями в цепи обратной связи и описываются апериодическими звеньями с постоянными времени  $\tau_{dm}$  и  $\tau_{du}$ .

На основании изложенного составлена программа моделирования датчика с регулятором по состоянию, который является, с учетом инерционности датчиков углов и датчиков моментов, динамической системой 12-го порядка. Для интегрирования уравнений состояния используется метод Милна 5-го порядка с предсказанием – коррекцией с плавающим шагом. Допустимые относительные и абсолютные погрешности вычисления переменных состояния на каждом шаге интегрирования принимались равными  $1 \times 10^{-5}$ .

Анализ результатов показывает эффективность предложенного способа разделения обратной связи на измерительную и демпфирующую, заключающуюся в отделении низкочастотного информационного сигнала от высокочастотных нутационных колебаний.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о возмож-

ности использования редуцированного наблюдателя Льминбергера для восстановления информации об угловой скорости ротора.

При использовании фильтра Калмана все переменные состояния, подаваемые на вход регулятора, берутся с выхода фильтра. Для оценки эффективности работы фильтра в программу введен блок вычисления среднего значения по времени и дисперсии выходных сигналов ДУС согласно выражениям

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt, \\ D_x(t) &= \frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x}) dt. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Разработан макет ДНГ, позволяющий производить проверку цепи обратной связи. Реализован аналоговый регулятор и наблюдатель Льминбергера на операционных усилителях К14СУД17Б. Макет имеет высокую стабильность параметров, благодаря применению указанных выше прецизионных усилителей. Макет может использоваться в учебных целях для изучения свойств ДНГ, аналогового регулятора и наблюдателя Льминбергера, а также датчика угловой скорости, построенного на базе динамически настраиваемого гироскопа.

В четвертой главе рассматриваются погрешности датчика угловой скорости и их влияние на динамику процесса вычисления параметров ориентации. Модель представлена в аналитическом виде и в виде программы, моделирующей работу датчика. Полученные выражения позволяют оценить зависимость токов в датчиках моментов от смещения нулей всех электронных устройств во всем частотном диапазоне. Постоянные смещения нулей датчиков углов и интеграторов сигналов с датчиков углов приводят к появлению

нию постоянных составляющих токов в датчиках моментов, которые будут являться погрешностями в процессе измерения. Смещения нулей остальных электронных устройств влияют на токи в датчиках моментов только в динамике.

В качестве выходных сигналов ДУС могут быть использованы выходные напряжения регулятора измерительного контура. Выражение для вектора напряжений показывает, что на погрешность измерений влияют постоянные смещения нулей всех электронных устройств, стоящих в цепи обратной связи ДУС. Поэтому предпочтительнее использовать в качестве информационного сигнала датчика сигнала, пропорциональный не напряжению, а току, потребляемому датчиком момента.

ДУС, построенный на базе ДНГ, является двухкомпонентным измерителем угловой скорости. Следовательно, для построения БСО достаточно использовать два ДУС, расположенных таким образом, что оси их кинетических моментов перпендикулярны друг другу. Вариант такой БСО рассматривается в данной главе. Проводится моделирование режима работы БСО с учетом динамики ДУС. Анализируются погрешности БСО от погрешностей установки ДУС относительно опорной системы координат и от погрешностей измерений самого ДУС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. С целью уменьшения габаритов гироскопа и расширения функциональных возможностей предложено совмещать у вала две функции:  
а) связующего элемента между ротором гироскопа и ротором электропривода; б) упругого элемента.

2. Получена математическая модель датчика угловой скорости с регулятором по состоянию и с наблюдаемыми устройствами Льюисбергера и Калмана.

3. Исследованы погрешности датчика угловой скорости со статическим и астатическим законами обратной связи. Показано, что предложенный датчик угловой скорости с интегральной обратной связью имеет улучшенные характеристики: в нем отсутствуют погрешности от углового ускорения в измерительном канале и меньший уровень погрешностей от угловых ускорений по перекрестной связи между измерительными каналами.

4. Предложена методика параметрического синтеза датчика угловой скорости, включающая в себя совокупность программ, структур файлов данных, с помощью которых проведен анализ динамических свойств, их синтез и осуществлено численное моделирование предлагаемого датчика в частотной и временной областях.

5. Предложено редуцированное наблюдающее устройство Льюинбергера второго порядка, восстанавливающее значение угловой скорости ротора без увеличения уровня шума. Предложены более сложные наблюдающие устройства Калмана 6-го и 8-го порядков, увеличивающие точность восстановления значений измеряемых угловых скоростей, но усложняющие структуру обратной связи.

6. Получены модели погрешностей датчика угловой скорости от смещения нулей всех электронных устройств, стоящих в цепи обратной связи, для двух вариантов выходных сигналов: а) по токам в датчиках моментов; б) по напряжениям измерительного контура. Модели погрешностей позволяют исследовать влияние смещения нулей электронных устройств во всем частотном диапазоне информационного сигнала. На основании анализа моделей погрешностей сделан вывод о преимуществе выходного сигнала по току перед выходным сигналом по напряжению.

7. Предложенная методика анализа и синтеза, проверенная на динамической системе 6-го порядка, имеет самостоятельное

значение в разработке динамических систем с помощью численно - аналитических методов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. А.с. 835194 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01C 19/02. Роторный вибрационный гироскоп/ Д.А.Кацай, А.С.Хмелевский (СССР); Челябинск.политехн. ин-т. 2876810; Заявлено 28.01.80; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 02.02.81.

2. А.с. 837156 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01C 19/02. Роторный вибрационный гироскоп/ Д.А.Кацай, А.С.Хмелевский (СССР); Челябинск.политехн. ин-т. 2877085; Заявлено 30.01.80; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 06.02.81.

3. А.с. 871602 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01C 19/22. Роторный вибрационный гироскоп/ Ю.П.Ермаков, Д.А.Кацай, В.Ю.Клюев, А.Н.Лысов (СССР); Челябинск.политехн. ин-т. 2924280; Заявлено 12.05.80; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 08.06.81.

4. А.с. 886607 СССР, МКИ<sup>3</sup> G01C 25/00. Способ определения угловой скорости настройки динамически настраиваемого гироскопа / Ю.П.Ермаков, Д.А.Кацай, В.Ю.Клюев, А.Н.Лысов (СССР); Челябинск.политехн. ин-т. 2958091; Заявлено 16.07.80; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 03.08.81.

5. Кацай Д.А. Влияние направления смещения центра масс на динамику однороторного ньютонометра // Сб. статей Челяб. политехн. ин-та.-Челябинск, 1983.-с.

6. Кацай Д.А. Датчик угловой скорости. Блок ориентации для БИНС, потроенный на ДУС: Отчет о научно - исследовательской работе по теме 58ПБ3 "Разработка математических моделей, алгоритмов и программ функционального синтеза бесплатформенных инерци-

альных навигационных систем"/Номер государственной регистрации 01930010550. Инвентарный номер 02940000830.- Челябинск, ЧГТУ, 1994. - с.39-125.

7. Кацай Д.А. Алгоритм и программа для задачи повышения точности бесплатформенной инерциальной навигационной системы оптимальной фильтрацией переменных навигационной информации. : Отчет о научно - исследовательской работе по теме 58П53 "Разработка математических моделей, алгоритмов и программ точностного синтеза бесплатформенных инерциальных навигационных систем"/ Номер государственной регистрации 01930010550. Инвентарный номер 02950000547. - Челябинск, ЧГТУ, 1995. - с.77-84,120-121.

8. Кацай Д.А., Клюев В.Ю., Милостивый С.П. Структурные методы повышения точности гироскопических систем на базе ДНГ//Всесоюзная НТК "Гироскопические системы и элементы" 27-29 мая 1986 - г.: Тезисы докладов - М., 1986. с.55-56.

9. Кацай Д.А., Клюев В.Ю. Структурно - параметрический - синтез и калибровка датчика угловой скорости, построенного на - ДНГ// Изв. вузов СССР-Приборостроение, т.ХХХIII, N 1, 1990.-с.29 - 36.

10. Кацай Д. А., Клюев В. Ю., Лысов А. Н. Динамически настраиваемые гироскопы: Учебное пособие / Под ред. А. Н. Лысова. - Челябинск, 1983.-81 с.

11. Кацай Д. А., Лысов А. Н., Хмелевский А.С. Применение ЭВМ для исследования и проектирования гироскопических приборов и систем: Учебное пособие / Под ред. А.Н.Лысова. - Челябинск, 1981.-84 с.

12. Кацай Д. А., Лысов А. Н., Хмелевский А.С., Яненков - В.Д. Машинный анализ и синтез линейных гироскопических систем: Учебное пособие / Под ред. А.Н.Лысова. - Челябинск, 1982.-42 с.

*издательство*

Издательство Челябинского  
государственного технического университета

ЛР № 020364 от 20.01.92. Подписано в печать 28.11.95. Формат  
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 0,83.  
Тираж 100 экз. Заказ 388/б26.  
УОП издательства. 454080, г.Челябинск, пр.им. В.И.Ленина, 76.