

4565304

На правах

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Баратали Хенди

УДК 531.383

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНЕРЦИОННОГО
ДЕМПФИРОВАНИЯ ГИРОСИСТЕМ ПРИМЕНЕНИЕМ
НЕЛИНЕЙНОЙ УПРУГО-ДИССИПАТИВНОЙ СВЯЗИ**

05.11.03 — Гироскопы, навигационные приборы и комплексы

Аннотация

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва — 1999

Работа выполнена в МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель : - доктор технических наук, профессор
Черников С. А.

Официальные оппоненты : - доктор технических наук, профессор
Камкин Е. Ф.
- кандидат технических наук, доцент
Солодов В. И.

Ведущая организация : Южно-Уральский Государственный Университет

Защита состоится " 19 " января ²⁰⁰⁰ ~~1999~~ г. на заседании
диссертационного совета К 053.15.02 МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу :
п. Д. 5.

...ся в библиотеке МГТУ им. Н. Э.

" 1999г

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1565307

Хенди Б. Повышение эффекти

1565307

...вета


Подчизнев В. П.

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Возможности авиационной техники во многом зависят от возможностей и точности гироскопических систем, используемых в качестве чувствительных элементов системы управления и в качестве систем стабилизации и навигации. Поэтому достижение новых возможностей в создании более точных гироскопических приборов и систем открывает новые перспективы для дальнейшего развития в области авиационной техники.

Кроме того, с появлением интереса к полёту на другие планеты солнечной системы предъявляются новые требования к точности гироскопических систем.

По этим причинам тема повышения точности гироскопических приборов и систем, как и раньше, является актуальной, и каждая попытка уменьшения погрешностей и усовершенствования системы и прибора оправдывается, сколько бы ни было трудоемко это не было.

Поскольку точностные характеристики гиросистемы связаны с ее демпфирующими свойствами, то возникает задача демпфирования гиросистем.

Проблема демпфирования гиросистем состоит в противоречивости требований высокой статической и динамической точности, с одной стороны, и устойчивости с другой, при этом увеличение демпфирующих моментов относительно осей карданова подвеса, повышая степень устойчивости гиросистемы, в то же время ухудшает характеристики её вынужденного движения в диапазоне низких частот. Однако повышение статической точности путем уменьшения демпфирующих моментов приведёт к ухудшению динамических характеристик на резонансных частотах и уменьшению запаса устойчивости системы. Существенно облегчить задачу стабилизации слабо демпфируемых гиросистем и сгладить противоречие между точностью и устойчивостью позволяет способ инерционного демпфирования.

В литературе встречаются работы, посвященные теме инерционного демпфирования. В последнем десятилетии многие работы посвящены этой теме, и особенно теме применения ИД в гиросистемах. Но в области гиросистем большинство работ ограничены применением линейного ИД. Возможности линейного ИД для повышения его эффективности ограничены. Использование нелинейных ИД можем получить новые возможности инерционного демпфирования гиросистем. Нелинейное инерционное демпфирование применяется и изучается в технике. Одной из причин повышенного интереса к этой задаче является стремление использовать нелинейные свойства ИД для повышения его эффективности.

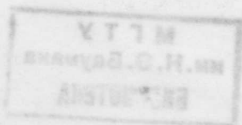
Цель и задачи исследования

Настоящая диссертационная работа посвящена теме нелинейного инерционного демпфирования гироскопических систем (ГС). Под гиросистемой здесь понимается трехступенный гироскоп с обратной связью. Например, одноосный силовой гиросtabilизатор; трехступенный гироскоп; указатель курса; гироскопический датчик линейных ускорений; одноосный сферический поплавковый гиросtabilизатор и т. п. .

Целью работы является исследование возможности улучшения динамических характеристик инерционно демпфируемых ГС введением нелинейной упруго-диссипативной связи.

Для достижения поставленной цели в работе рассмотрены следующие вопросы:

- Улучшение динамических характеристик инерционно демпфируемых гиросистем введением люфта в диссипативную связь
- применение сухого трения в качестве диссипативной связи ИД, установленного на ГС
- Совместное применение люфта и сухого трения в ИД
- Анализ устойчивости нелинейной ГС



Методы исследования

Решение поставленной задачи осуществляется с использованием методов механики, теории нелинейных систем автоматического управления, и вычислительной техники. В качестве основного метода исследования нелинейной ГС используется метод гармонической линеаризации, а для уточнения результатов учитываются высшие гармоники. Для проверки, нелинейные дифференциальные уравнения системы решаются численным путем на компьютере, используя метод Рунга-Куты четвертого порядка. Вычислительные процедуры, построение графиков и много других математических операций выполняются с помощью пакетов Mathcad и Matlab.

Научная новизна

- Предложены нелинейные законы упруго-диссипативной связи, позволяющие существенно улучшить динамические характеристики инерционно демпфируемой ГС в межрезонансном диапазоне частот при заданном диапазоне внешних воздействий.
- Разработана методика синтеза оптимальных параметров нелинейной упруго-диссипативной связи по критерию $\min \max$ амплитуды вынужденных колебаний механической части ГС как объекта управления для заданного диапазона внешних воздействий.
- Получены условия устойчивости ГС с нелинейным ИД, и разработаны методы ее обеспечения

Объем работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, основных выводов и списка литературы. Работа изложена на 129 страницах машинного текста, включая 62 рисунка.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы, сформулированы цель диссертационной работы и основные решаемые задачи. Получены технические уравнения движения ГС с ИД в общем следующем виде

$$A \ddot{\alpha} + \mu_{\alpha} \dot{\alpha} - 2(I_{py} + I_{ky} - I_{kz}) \dot{\alpha} \dot{\beta} \sin \beta \cos \beta - H \dot{\beta} \cos \beta - K_{cm} W_{cm}(p) \beta + L_{\alpha} = M_{\alpha} + M_z \sin \beta;$$

$$B \ddot{\beta} + \mu_{\beta} \dot{\beta} + (I_{py} + I_{ky} - I_{kz}) \dot{\alpha}^2 \sin \beta \cos \beta + H \dot{\alpha} \cos \beta + L_{\beta} = M_{\beta};$$

$$I \ddot{\gamma} - L_{\gamma} = M_{\gamma};$$

$$\frac{d}{dt} (I_{pz} (\dot{\varphi} - \dot{\alpha} \sin \beta)) = \frac{dH}{dt} = M_z.$$

Здесь A, B и α, β - приведенные моменты инерции и углы поворота ГС относительно наружной и внутренней осей соответственно; I, γ - момент инерции и угол поворота маховика демпфера относительно оси, на которой он установлен; $\dot{\varphi}$ - угловая скорость ротора гироскопа; H - кинетический момент гироскопа; $\mu_{\alpha}, \mu_{\beta}$ - коэффициенты вязкого трения в опорах наружной и внутренней осей; $L_{\alpha}, L_{\beta}, L_{\gamma}$ - упруго-диссипативные моменты взаимодействия ГС с инерционной массой; $M_{\alpha}, M_{\beta}, M_{\gamma}, M_z$ - моменты внешних сил; $K_{cm} W_{cm}(p)$ - момент разгрузки развиваемый двигателем разгрузки цепи обратной связи.

А также I_{uy_0} - момент инерции наружной рамки относительно её оси y_0 ;

I_{kx}, I_{ky}, I_{kz} - моменты инерции внутренней рамки карданова подвеса относительно осей x, y, z соответственно; I_{px}, I_{py}, I_{pz} - моменты инерции ротора гироскопа относительно осей x, y, z соответственно;

I_{Mx}, I_{My} - моменты инерции маховика демпфера относительно осей x, y . При этом

$$A = I_{uy_0} + (I_{ky} + I_{py} + I_{My}) \cos^2 \beta + (I_{kx} + I_{Mx}) \sin^2 \beta;$$

$$L_{\alpha} = L_{\gamma} = F_{\alpha} (\alpha - \gamma, \dot{\alpha} - \dot{\gamma}); \quad L_{\beta} = 0$$

- при установке демпфера на оси наружной рамки (оси стабилизации);

$$A = I_{\gamma a} + (I_{\gamma v} + I_{\gamma v}) \cos^2 \beta + I_{\gamma z} \sin^2 \beta ;$$

$$L_{\beta} = L_{\gamma} = F_{\beta}(\beta - \gamma, \dot{\beta} - \dot{\gamma}) ; \quad L_a = 0$$

- при установке демпфера на оси внутренней рамки (оси прецессии).

Далее дается анализ возможных нелинейных упруго-диссипативных связей применяемых в ИД.

Первая глава посвящена улучшению динамических характеристик инерционно демпфируемой ГС введением люфта в диссипативную связь. Показано, что с помощью линейного ИД улучшение динамических характеристик ГС в достаточно широкой области частот, определяемой узловыми точками, инвариантными по отношению к коэффициенту вязкого трения, достичь не удастся, поскольку амплитуда вынужденных колебаний демпфированной ГС в этом интервале частот оказывается существенно больше по сравнению с не демпфированной и примерно равной значению амплитуды в узловых точках при оптимальной настройке демпфера (см. рис.1). Из сравнения АЧХ 1 и 2 на рис.1 следует, что «отключение» диссипативной связи в межвариантном частотном диапазоне ($\Omega_1 \div \Omega_2$) создает принципиальную возможность повышения эффективности демпфирования. Это отключение можно реализовать, например, введением люфта в диссипативную связь в соответствии с механической моделью, представленной на рис.2.

Вводя люфт в диссипативную связь ИД, будем иметь дело с нелинейной системой, поэтому разделив систему (ГС) на линейную и нелинейную части, получаем уравнения движения инерционно демпфируемой ГС при отключении обратной связи в форме

$$\sigma + W_{\sigma}(p) \cdot F(\sigma) = \sigma_M ,$$

где

$$W_{\sigma}(p) = \frac{(A(B+I)p^2 + H^2)(C_2 + Sp)}{ABIp^4 + (A(B+I)C + H^2I)p^2 + H^2C}$$

- передаточная функция приведенной линейной части,

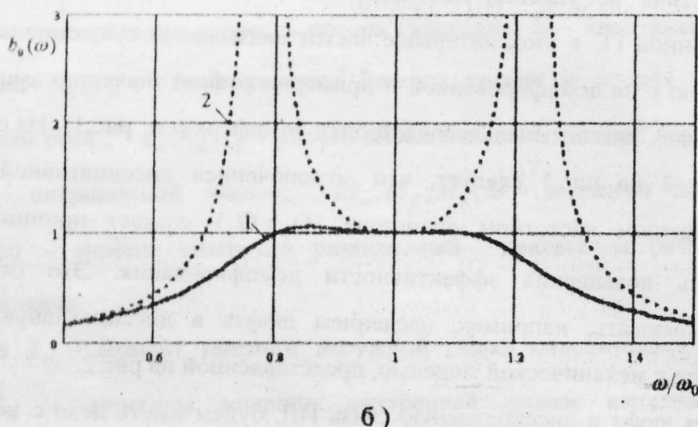
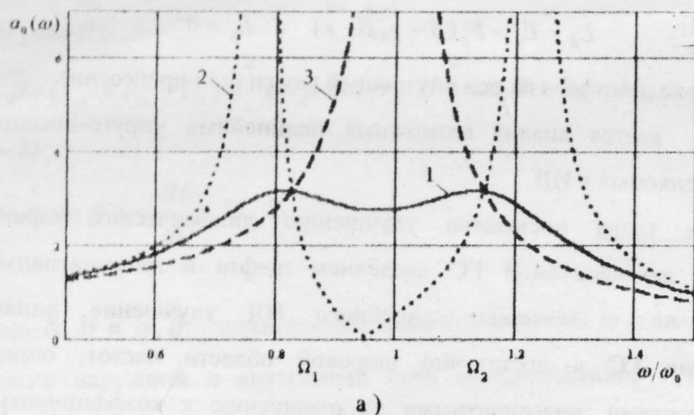


Рис. 1. Относительные АЧХ инерционно демпфированной ГС: а - АЧХ угла стабилизации, б - АЧХ угла закручивания. Кривая 1 при оптимальном настройке демпфера, кривая 2 при $s=0$, а кривая 3 при $s=\infty$

$$\sigma_M = W_M(p) \cdot M_a(p)$$

внешнее воздействие M_a , приведенное ко входу нелинейного элемента.

При этом

$$W_M(p) = \frac{I H p}{A B I p^4 + (A(B + \Gamma)C + H^2 I) p^2 + H^2 C}$$

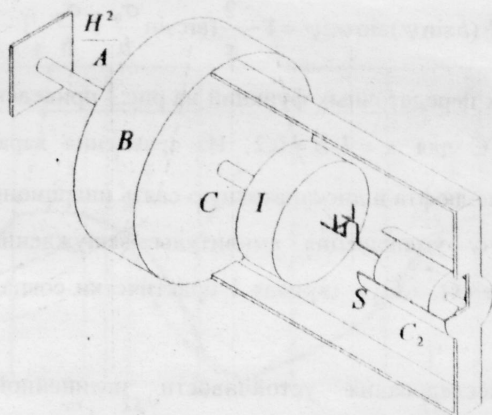


Рис. 2. Механическая модель ИД с люфтом установленного на оси прецессии ГС

и

$$F(\sigma) = \begin{cases} \sigma - \sigma_0, & \sigma \geq \sigma_0 \\ 0, & |\sigma| < \sigma_0 \\ \sigma + \sigma_0, & \sigma \leq -\sigma_0 \end{cases};$$

Поскольку линейная часть системы обладает свойством фильтра, для решения нелинейной системы применяем метод гармонической линеаризации. Таким образом передаточные функции ГС, характеризующие зависимости угла стабилизации α и угла закручивания σ от внешнего воздействия M_a определяются следующими выражениями:

$$W_q^\alpha(p) = \frac{\alpha(p)}{M_a(p)} = \frac{BHp^2 + (B+I)C + q(b)(B+I)(Sp + C_2)}{ABIp^4 + (A(B+I)C + H^2I)p^2 + H^2C + q(b)(A(B+I)p^2 + H^2)(Sp + C_2)}$$

$$W_q^\sigma(p) = \frac{\sigma(p)}{M_a(p)} = \frac{HIp}{ABIp^4 + (A(B+I)C + H^2I)p^2 + H^2C + q(b)(A(B+I)p^2 + H^2)(Sp + C_2)}$$

где
$$q(b) = \frac{1}{\pi b} \int_0^{2\pi} F(b \sin \psi) \sin \psi d\psi = 1 - \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{\sigma_0}{b} + \frac{\sigma_0}{b} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_0}{b} \right)^2} \right)$$

На основе этих передаточных функций на рис.3 приведены относительные АЧХ нелинейной ГС для $\kappa = I/B = 0,2$. Из сравнения характеристик 1 и 3 следует, что введение люфта в диссипативную связь инерционной массы решает поставленную задачу уменьшения амплитуды вынужденных колебаний в частотном диапазоне $(\Omega_1 + \Omega_2)$ (кривая 1 практически совпадает с кривой 2 в этом диапазоне).

Проведено исследования устойчивости нелинейной системы при замыкании обратной связи. С предположением устойчивости линейной исходной системы, рассмотрено влияние нелинейного элемента на устойчивости системы. Исследована абсолютная устойчивость нелинейной системы на основе кругового критерия. Показано, что абсолютная устойчивость имеет место только для системы с устойчивой линейной частью при условии, что годограф Найквиста линейной части располагается с права от вертикальной прямой, проходящей через точку $(-1, j0)$. Для случаев, когда условия абсолютной устойчивости не выполняются методом гармонической линеаризации проверено наличие периодических режимов.

При этом установлено, что неустойчивость линейной части (в частности система с жесткой обратной связью) приводит к возникновению автоколебаний или неустойчивости в нелинейной системе в целом. В случае устойчивости линейной части тоже в зависимости от параметров ГС и цепи обратной связи, в системе возможно возникновения автоколебаний. Для обеспечения устойчивости нелинейной системы даны рекомендации по выбору параметров цепи обратной связи.

Рассмотрена влияние вязкого трения в осях карданова подвеса, и установлено, что наличие вязкого трения в осях карданова подвеса в слабо демпфируемых ГС качественно не влияет на устойчивости системы.

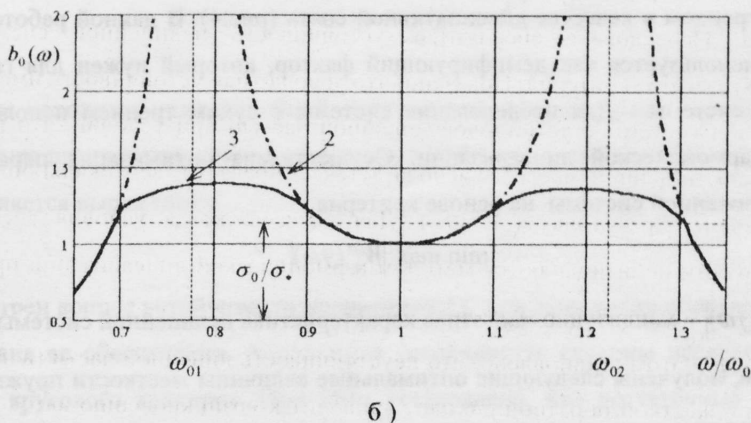
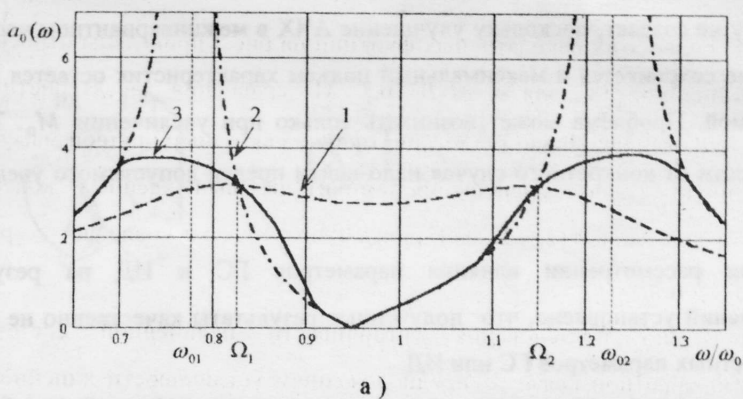


Рис. 3. Относительные АЧХ инерционно демпфированной ГС с люфтом в диссипативной связи

Получены АЧХ замкнутой ГС с люфтом в диссипативной связи ИД, и показано, что улучшение динамических характеристик в межвариантном частотном диапазоне ($\Omega_1 \div \Omega_2$) имеет место и в замкнутой системе.

Поскольку исследуемая система нелинейная, то амплитуда внешнего воздействия M_0 существенно влияет на оптимальную настройку люфта. Поэтому

проведена оценка этого влияния. При этом установлено, что уменьшение M_0 проблеме не создает, поскольку улучшение АЧХ в межвариантном частотном диапазоне сохраняется и максимальный подъем характеристик остается меньше допустимой. Проблема может возникать только при увеличении M_0 . Тогда в зависимости от конкретного случая надо найти предел допустимого увеличения M_0 .

При рассмотрении влияния параметров ГС и ИД на результаты исследований установлено, что полученные результаты качественно не зависят от конкретных параметров ГС или ИД.

Вторая глава посвящена исследованию инерционно демпфируемой ГС с сухим трением в качестве диссипативной связи (рис.4). В данной работе сухое трение используется как демпфирующий фактор, который нужен для гашения энергии системы. Для исследования системы с сухим трением используется метод гармонической линеаризации. Осуществлена оптимизация параметров линеаризованной системы на основе критерия

$$\min \max |W_q^a(j\omega)|.$$

где $|W_q^a(j\omega)|$ - амплитудно-частотная характеристика нелинейной системы.

При этом, получены следующие оптимальные величины жесткости пружины C_* и коэффициента сухого трения μ_* :

$$C_* = \frac{\kappa(1 - \kappa/2)}{(1 + \kappa)^2} \cdot \frac{H^2}{A}; \quad \left(\frac{\mu_*}{M_0} \right)^2 = \frac{3\pi}{32} \cdot \frac{I}{A(1 + \kappa)}, \quad \text{где } \kappa = \frac{I}{B}$$

Показано, что в диапазоне средних частот (где условия захватывания выполняются) характеристики системы с сухим трением практически совпадают с характеристиками линейной оптимальной системой с вязким трением (рис.5), что свидетельствует о верности метода оптимизации. В диапазоне низких и высоких частот (вне области захватывания) характеристики нелинейной

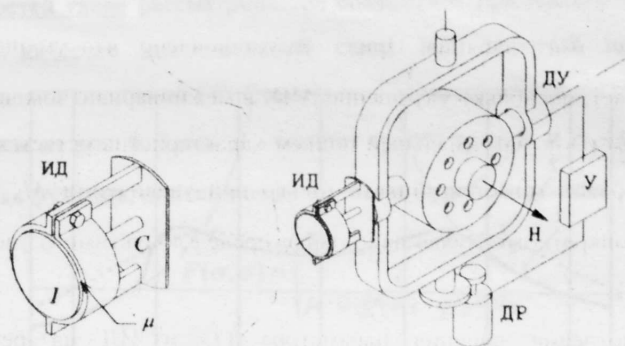


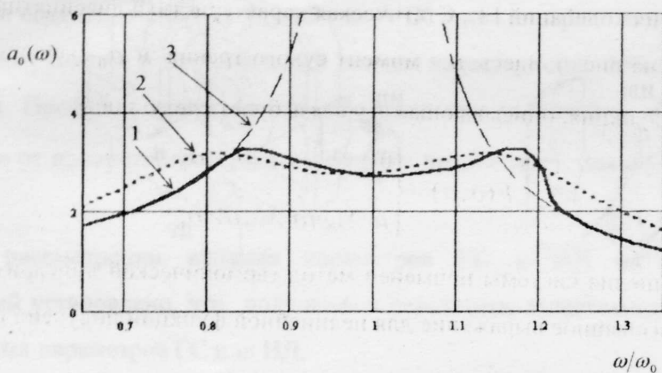
Рис. 4. Схема ИД с сухим трением в качестве диссипативной связи, установленного на внутренней оси ГС

системы находятся ниже линейной оптимальной. Максимальная относительная амплитуда практически совпадает с амплитудой в инвариантных точках, которая определяется выражением

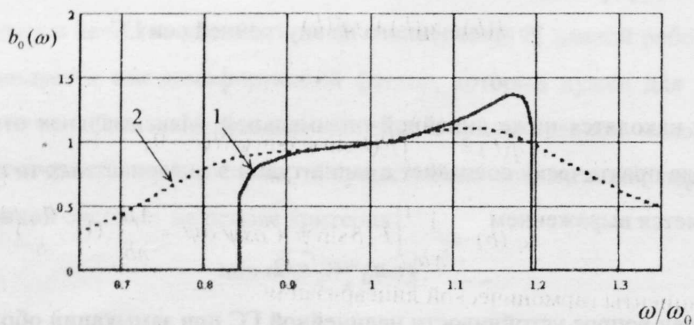
$$a_0 = \sqrt{\kappa/2}.$$

Рассмотрен вопрос устойчивости нелинейной ГС при замыкании обратной связи, и условия ее обеспечения. Абсолютная устойчивость системы исследована на основе кругового критерия. При этом установлено, что достаточные условия абсолютной устойчивости не выполняются при любых параметров корректирующего контура. Поэтому методом гармонической линеаризации исследована возможность периодических режимов. Установлено, что в ГС с неустойчивой линейной частью в зависимости от начальных условий возникают автоколебания или неустойчивость. В случае устойчивости линейной части тоже в некоторых случаях может нарушаться устойчивость системы. Даны рекомендации по обеспечению устойчивости ГС.

Исследованы динамические характеристики замкнутой инерционно демпфируемой ГС с сухим трением.



а)



б)

Рис. 5. Относительные АЧХ механической части инерционно демпфируемой ГС с сухим трением

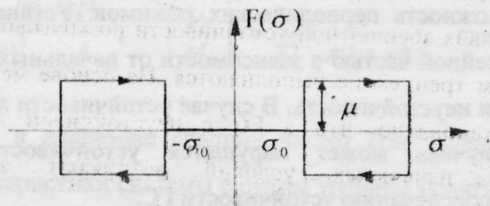


Рис. 6. Статические характеристики сухого трения с люфтом

В третьей главе рассматривается совместное применение люфта и сухого трения в качестве диссипативной связи ИД, который применяется для демпфирования колебаний ГС. Статическая характеристика диссипативной связи ИД показана на рис. 6. Здесь μ - момент сухого трения и σ_0 - величина люфта. Нелинейная функция, описывающая эту связь будет следующей

$$F(\sigma, \dot{\sigma}) = \begin{cases} 0, & |\sigma| < \sigma_0 \\ \mu \cdot \text{Sign} \dot{\sigma}, & |\sigma| \geq \sigma_0 \end{cases}$$

Для решения системы применен метод гармонической линеаризации. При этом линеаризованное выражение для нелинейной функции получено в виде

$$F(\sigma, \dot{\sigma}) = J(b) \cdot \dot{\sigma} ; \quad \sigma = b \sin(\omega t + \varphi),$$

где

$$J(b) = q(b) + jq'(b)$$

и

$$q(b) = \frac{1}{\pi b} \int_0^{2\pi} F(b \sin \psi) \sin \psi d\psi = 0,$$

$$q'(b) = \frac{1}{\pi b} \int_0^{2\pi} F(b \sin \psi) \cos \psi d\psi = \frac{4\mu}{\pi b} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{b}\right)$$

- коэффициенты гармонической линеаризации.

Показано, что совместное применение сухого трения и люфта существенно улучшает динамические характеристики ГС как в резонансной области, так и в области межинвариантной, поскольку при этом проявляются положительные эффекты как сухого трения, так и люфта.

При исследовании устойчивости нелинейной замкнутой системы показано, что условия абсолютной устойчивости по круговому критерию, как и в случае ГС с сухим трением не выполняются. На основе метода гармонической линеаризации установлено, что в ГС с неустойчивой линейной частью в зависимости от начальных условий возникают автоколебания или неустойчивость. Даны рекомендации по выбору параметров обратной связи, обеспечивающих устойчивость нелинейной системы.

Получены АЧХ замкнутой ГС с люфтом и сухим трением в качестве диссипативной связи ИД. Показано, что улучшение характеристик ГС, которое было получено в механической части ГС, имеет места и для замкнутой нелинейной системы.

Основные результаты и выводы

В ходе исследований получены следующие научно-технические результаты.

1. Предложены нелинейные законы упруго-диссипативной связи, позволяющие существенно улучшить динамические характеристики инерционно демпфируемой ГС в межрезонансном диапазоне частот при заданном диапазоне внешних воздействий.
2. Разработана методика синтеза оптимальных параметров нелинейной упруго-диссипативной связи по критерию минимизации максимальной амплитуды вынужденных колебаний механической части ГС как объекта управления для заданного диапазона внешних воздействий.
3. Установлено, что амплитуда внешнего воздействия существенно влияет на оптимальную настройку люфта. Даны рекомендации по выбору величины люфта, позволяющего сгладить влиянию внешнего воздействия.
4. Выявлены общие свойства динамических характеристик приведенной линейной части инерционно демпфируемой ГС с нелинейной упруго-диссипативной связью, на основе которых найдены условия устойчивости ГС с нелинейным ИД. Показано, что необходимым условием устойчивости нелинейной системы является устойчивость линейной части системы. Даны рекомендации по выбору параметров цепи обратной связи, обеспечивающих устойчивость нелинейной ГС.
5. Результаты исследования на основе метода гармонической линеаризации по первой гармонике подтверждены учетом высших гармоник, и сопоставлены с

численным решением нелинейных дифференциальных уравнений. При этом установлена погрешность метода меньше 10-15 %.

6. Полученные результаты могут быть распространены и применены в так называемых « системах гироскопического демпфирования ».

Публикация

По материалам диссертационной работы опубликована следующая статья :

- Черников С. А. , Хенди Б. Улучшение динамических характеристик инерционно демпфируемых гироскопических систем введением люфта в диссипативную связь // Вестник МГТУ – Сер. Приборостроение. – 1999. - № 1. – С. 69-75.

Подписано к печати 24. 11. 99 г.

Зак. 160т. объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана