

6
А-65

2015

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

Г.М.Проскураков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БЕЗОБОГРЕВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОДЪЯВКОВЫХ ГИРОТАХОМЕТРОВ

На русском языке

(05.257 - гироскопические приборы)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ленинград-1971

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)

Г.М.Проскураков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БЕЗОБОГРЕВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОТАХОМЕТРОВ

На русском языке

(05.257 - гироскопические приборы)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ленинград-1971



Работа выполнена в Саратовском политехническом институте

- Научный руководитель - кандидат технических наук, доцент В.В.Протасов
- Научный консультант - кандидат технических наук, доцент П.К.Плотников
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор П.И.Сайдов,
- доктор технических наук, профессор С.И.Макарихин

Автореферат разослан "31" декабря 1971 года.
 Защита диссертации состоится " " 1971 г.
 на заседании Совета по присуждению ученых степеней кафедр
 "Автоматика и телемеханика" и "Гироскопические устройства" Ле-
 нинградского ордена Ленина электротехнического института имени
 В.И.Ульянова (Ленина) г.Ленинград, П-22, ул.проф.Попова, дом 5.

Ученый секретарь Совета П.Тимошинов

Поплавковые гиротаксометры с электрической обратной связью по сравнению с сухими гиротаксометрами с механической пружиной обладают повышенной чувствительностью к измеряемым угловым скоростям, точностью измерения, способностью работать в режиме стабилизации и в режиме управления объектом.

Благодаря этим положительным качествам поплавокные гиротаксометры с электрической обратной связью в последнее время нашли широкое применение в системах стабилизации и управления движущимися объектами.

Приборная жидкость, применяемая в поплавокных гиротаксометрах, обеспечивает устойчивость работы прибора относительно действия динамических возмущений: линейных, вибрационных и ударных нагрузок.

Однако взвешивающая и демпфирующая жидкость определяет существенный недостаток поплавокных гиротаксометров - температурную возмущаемость параметров и характеристик прибора.

Для обеспечения температурной невосприимчивости поплавокных гиротаксометров в настоящее время применяются два способа стабилизации характеристик приборов: обогревный и безобогревный.

Обогревный способ стабилизации характеристик поплавокных гиротаксометров сводится к термостатированию внутреннего объема прибора. Отличаясь значительной точностью стабилизации характеристик прибора, этот способ обладает существенными недостатками, основными из которых являются: значительное потребление мощности бортовых источников электропитания и большое время тепловой готовности прибора.

Безобогревный способ стабилизации характеристик поплавокных и жидкостных гиротаксометров в настоящее время сводится к механическому регулированию с изменением температуры геометрических параметров поплавка (зазора, перекрытия, радиуса) так, чтобы коэффициент жидкостного демпфирования поплавка не зависел от изменяющейся температуры. Механические системы безобогревной стабилизации лишены недостатков обогревных способов стабилизации; вместе с тем они являются сравнительно неточными (так как учитывают только один источник температурной неустойчивости характеристики прибора - жидкость), являются динамически возмущаемыми и значительно усложняют конструкцию чувствительного элемента гиротаксометра.

Для исключения недостатков как обогревных, так и механических безобогревных способов стабилизации характеристик поплавковых гироскопов предлагается электрическая система безобогревной стабилизации.

Настоящая работа посвящена принципиальному и практическому обоснованию возможности создания электрической системы безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гироскопов.

В соответствии с поставленной целью в работе решены три основные задачи:

1. Исследование динамики гироскопа с электрической обратной связью и определение аналитических выражений для основных параметров и характеристик прибора с учетом его конструктивных особенностей.

2. Выявление источников температурной неустойчивости гироскопов и оценка степени влияния этих источников на основные характеристики и параметры приборов.

3. Определение необходимых и достаточных условий температурной нечувствительности гироскопов с электрической обратной связью и проверка физической и практической реализуемости найденных условий электрической безобогревной стабилизации приборов.

Показано, что вопросы температурной стабилизации характеристик гироскопов на основе применения безобогревных способов являются частной задачей общей проблемы - проблемы инвариантности. Основой построения схем безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гироскопов является метод параметрической компенсации.

В данной работе проведено исследование предлагаемого электрического способа безобогревной стабилизации характеристик поплавкового гироскопа. Рассмотрены способы физической и практической реализации условий электрической безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гироскопов в виде температурных характеристик сопротивлений - компенсаторов, выполненных на основе применения серийных терморезисторов.

Основные теоретические положения работы проверены экспериментально. Конкретный цифровой материал по определению динамических свойств приборов приведен в работе на основе использования результатов экспериментов и данных реальных гироскопов типа

ГМД-148, ДУСМ-600, ДУС-688, ДУСМЭП-599, ГТ-1Б.

Работа состоит из введения и четырех глав. Отдельные разделы работы могут представлять самостоятельный интерес для анализа динамики двухстепенных гироскопов.

В первой главе приведен обзор современного состояния вопроса о температурной нечувствительности поплавковых гироскопов. Приведен сравнительный анализ схем обогревной и безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гироскопов. Показано, что схемы безобогревной стабилизации в наиболее полной мере, нежели схемы термостатирования, соответствуют основным направлениям и тенденциям развития и совершенствования рамочных гироскопов:

- увеличение надежности и долговечности,
- миниатюризация,
- ограничение энергопотребления,
- снижение времени готовности и др.

Как показывает ряд исследований, установившийся тепловой режим в некоторых гироскопических приборах даже при наличии обогрева наступает только по истечении 2-3 часов (хотя по техническим условиям время тепловой готовности прибора составляет несколько минут). Это связано с инерционностью тепловых процессов прогревания внутреннего объема прибора. Мощность, потребляемая системами термообогрева поплавковых гироскопов, оставляет порядка 50-100 вт и более, а пусковые токи достигают нескольких ампер. В настоящее время принято считать, что реализация мощности в 1 ватт бортового энергопитания требует применения дополнительно источника электропитания весом порядка 1 кг. Поэтому экономичность расходов электроресурсов за счет исключения системы термостатирования и применения системы безобогревной стабилизации одновременно означает значительное уменьшение габаритов и весов бортового электрооборудования.

Схемы безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гироскопов практически готовы к работе сразу после включения и совершенно не требуют дополнительной мощности бортового электропитания.

Рассмотрены области возможного применения поплавковых гироскопов на движущихся объектах, где особенно важно проявление

преимуществ безобогревных систем стабилизации характеристик приборов. Даны сравнительная характеристика схем безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гиротахометров и постановка задачи.

Вторая глава работы посвящена определению основных соотношений для параметров и характеристик гиротахометров с электрической обратной связью и анализу чувствительности частотных характеристик прибора к вариациям параметров.

Показано, что чувствительный элемент гиротахометра с учетом упруго-демпфирующих свойств конструкции прибора представляет собой механическую систему с четырьмя ограниченными степенями свободы. Линеаризованные уравнения движения двухстепенного гироскопа с учетом конечной жесткости конструкции приведены к векторно-матричной форме:

$$A(p) \begin{pmatrix} \beta(p) \\ d(p) \\ d_p(p) \\ \beta_p(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (J_u - J_z)p \\ 0 \\ J_z p \\ H \end{pmatrix} \cdot \omega_z(p) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} [M_{\partial n}(p) + \sum M_n(p)], \quad (1)$$

где $A(p)$ - собственная матрица линейного преобразования, составлена из операторных коэффициентов, зависящих от конструктивных параметров гироскопа $J_u; J_z; H$ и др.;

$d(p); \beta(p); d_p(p); \beta_p(p)$ - операторные изображения углов ограниченных степеней свободы гироскопа;

$\omega_z(p)$ - операторное изображение измеряемой угловой скорости;

$M_{\partial n}(p); \sum M_n(p)$ - операторные изображения момента датчика моментов и суммарного момента помех.

На основании уравнения (1) получена передаточная функция двухстепенного гироскопа:

ГМД-148, ДУСМ-600, ДУС-688, ДУСМЭП-599, ГТ-1Б.

Работа состоит из введения и четырех глав. Отдельные разделы работы могут представлять самостоятельный интерес для анализа динамики двухстепенных гироскопов.

В первой главе приведен обзор современного состояния вопроса о температурной невозмущаемости поплавковых гиротахометров. Приведен сравнительный анализ схем обогревной и безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гиротахометров. Показано, что схемы безобогревной стабилизации в наиболее полной мере, нежели схемы термостатирования, соответствуют основным направлениям и тенденциям развития и совершенствования рамочных гиротахометров:

- увеличение надежности и долговечности,
- миниатюризация,
- ограничение энергопотребления,
- снижение времени готовности и др.

Как показывает ряд исследований, установившийся тепловой режим в некоторых гироскопических приборах даже при наличии обогрева наступает только по истечении 2-3 часов (хотя по техническим условиям время тепловой готовности прибора составляет несколько минут). Это связано с инерционностью тепловых процессов прогревания внутреннего объема прибора. Мощность, потребляемая системами термообогрева поплавковых гиротахометров, составляет порядка 50-100 вт и более, а пусковые токи достигают нескольких ампер. В настоящее время принято считать, что реализация мощности в 1 ватт бортового энергопитания требует применения дополнительно источника электропитания весом порядка 1 кг. Поэтому экономичность расходов электроресурсов за счет исключения системы термостатирования и применения системы безобогревной стабилизации одновременно означает значительное уменьшение габаритов и весов бортового электрооборудования.

Схемы безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гиротахометров практически готовы к работе сразу после включения и совершенно не требуют дополнительной мощности бортового электропитания.

Рассмотрены области возможного применения поплавковых гиротахометров на движущихся объектах, где особенно важно проявление

преимуществ безобогревных систем стабилизации характеристик приборов. Дана сравнительная характеристика схем безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гиротаксометров и постановка задачи.

Вторая глава работы посвящена определению основных соотношений для параметров и характеристик гиротаксометров с электрической обратной связью и анализу чувствительности частотных характеристик прибора к вариациям параметров.

Показано, что чувствительный элемент гиротаксометра с учетом упруго-демпфирующих свойств конструкции прибора представляет собой механическую систему с четырьмя ограниченными степенями свободы. Линеаризованные уравнения движения двухстепенного гироскопа с учетом конечной жесткости конструкции приведены к векторно-матричной форме:

$$A(p) \begin{pmatrix} \beta(p) \\ d(p) \\ d_p(p) \\ \beta_p(p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (J_n - J_z)p \\ 0 \\ J_z p \\ H \end{pmatrix} \omega_z(p) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} [M_{ан}(p) + \sum M_n(p)], \quad (1)$$

где $A(p)$ - собственная матрица линейного преобразования, составлена из операторных коэффициентов, зависящих от конструктивных параметров гироскопа $J_n; J_z; H$ и др.;

$d(p); \beta(p); d_p(p); \beta_p(p)$ - операторные изображения углов ограниченных степеней свободы гироскопа;

$\omega_z(p)$ - операторное изображение измеряемой угловой скорости;

$M_{ан}(p); \sum M_n(p)$ - операторные изображения момента датчика моментов и суммарного момента помех.

На основании уравнения (1) получена передаточная функция двухстепенного гироскопа:

$$W_{\omega_z \beta}(p) = \frac{H \sum_{j=0}^3 \beta_j p^{3-j}}{p \sum_{i=0}^2 a_i p^{2-i}} \quad (2)$$

Установлено, что динамические коэффициенты a_i и β_j зависят от параметров упруго-демпфирующей податливости конструкции гиротаксометра.

Для количественной оценки конструкционной жесткости и коэффициента конструкционного демпфирования проведены экспериментальные исследования основных соединений типовых гиротаксометров.

Установлено, что конструкционная жесткость и коэффициент конструкционного демпфирования рассмотренных соединений находятся в пределах $(5+50) \cdot 10^5$ гсм и $(10+200)$ гсмсек соответственно.

Экспериментально показано, что зависимости конструкционной жесткости и конструкционного демпфирования соединений гиротаксометров от температуры представляют линейно падающие с ростом температуры прямые с температурным коэффициентом, находящимся в пределах $-(1+8) \cdot 10^{-8} 1/^\circ C$.

С учетом дополнительной степени свободы поплавок относительно оси чувствительности теоретически учтено демпфирование жидкостью экваториальных колебаний поплавок, коэффициент которого достигает $(1+50)$ гсмсек. Кроме того, была уточнена формула для определения коэффициента жидкостного демпфирования осевых колебаний поплавок, которая выразилась через динамическую вязкость η жидкости и геометрический фактор Γ поплавок:

$$k_{ж} = \frac{2\pi}{981} \cdot \Gamma \eta \quad (3)$$

Геометрический фактор Γ поплавок учитывает конкретную конструкцию и геометрию поплавок.

Количественная оценка частотных характеристик, соответствующих передаточной функции (2) двухстепенных гироскопов, показала, что динамика чувствительного элемента гиротаксометра в первом приближении описывается упрощенной передаточной функцией интегрирующего апериодического звена:

$$W_{\omega_z \beta}(p) \approx \frac{H}{p(J_{np}p + k_{\alpha\beta np})} \quad (4)$$

Сравнением коэффициентов при соответствующих членах разложения аппроксимируемой (2) и аппроксимирующей (4) передаточных функций в ряд Маклорена получены уравнения связи для определения приведенных параметров двухстепенных гироскопов (J_{np} и $k_{\alpha\beta np}$):

$$J_{np} = J + \frac{H^2}{K_n^{\alpha}} + \frac{H^2}{K_n^{\beta}} + k_{\alpha\beta} \left(\frac{k_{\alpha}^{\alpha}}{K_n^{\alpha}} + \frac{k_{\beta}^{\beta}}{K_n^{\beta}} + \frac{k_{\alpha\beta}}{K_n^{\alpha\beta}} \right) \quad (5)$$

$$k_{\alpha\beta np} = k_{\alpha\beta},$$

где K_n^{α} и K_n^{β} - конструкционная жесткость и коэффициент конструкционного демпфирования соответственно относительно n -ой оси.

Анализ применяемых на практике электрических обратных связей гироскопов показал, что динамика прохождения сигнала через электрическую обратную связь (ЭОС) описывается достаточно точно обобщенной передаточной функцией форсирующего инерционного звена:

$$W_{\text{ЭОС}}(p) = k_n \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}, \quad (6)$$

где k_n - жесткость ЭОС;

$T_1; T_2$ - постоянные времени форсирующего и инерционного звеньев ЭОС соответственно.

На основе обобщенной структурной схемы гироскопа с электрической обратной связью, построенной с учетом выражений (4) и (6), получены уравнения движения прибора относительно действия измеряемой угловой скорости. Эти уравнения приведены к виду:

$$(p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3) i_j(p) = a_3 K_j p^{j-1} \omega_z(p), \quad (7)$$

$$(j = 1, 2)$$

где $a_1; a_2; a_3$ - динамические коэффициенты уравнения;

K_j ($j=1,2$) - статические передаточные коэффициенты прибора по сигналам угловой скорости (K_1) и углового ускорения (K_2).

Частотные характеристики гироскопа с ЭОС, полученные на основе уравнений (7), приведены к безразмерной форме.

При определении условий электрической безобогревной стабилизации характеристик гироскопа возникает задача выбора начальных условий. С этой целью, исходя из условий оптимальности по обеспечению минимального амплитудного искажения и максимального быстродействия гироскопа, найдены выражения для определения рациональных параметров ЭОС: при заданных параметрах чувствительного элемента прибора ($J; k_{\alpha\beta}$):

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{4}{\sqrt{2}\omega_0} + \frac{\sqrt{2}}{\omega_0} \left(\frac{k_{\alpha\beta}}{J\omega_0} \right)^2 - \frac{3k_{\alpha\beta}}{J\omega_0^2} \\ T_2 &= \frac{1}{\frac{3\omega_0}{\sqrt{2}} - \frac{k_{\alpha\beta}}{J}} \\ k_n &= \frac{J\omega_0^3}{3\omega_0 - \sqrt{2} \cdot \frac{k_{\alpha\beta}}{J}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Начальные значения параметров ЭОС ($T_{10}; T_{20}; k_{n0}$) при начальной температуре t_0 могут быть определены по формулам (8) при заданных параметрах чувствительного элемента ($J; k_{\alpha\beta}$) и частоте (ω_0) собственных недемпфированных колебаний прибора.

Для оценки степени влияния нестабильности параметров гироскопов с ЭОС (например, от изменяющейся температуры) на динамические свойства прибора определены функции чувствительности частотных характеристик к вариациям нормированных параметров. За функции чувствительности частотных характеристик гироскопа к вариациям параметров η и β приняты семейства зависимостей степени амплитудного ($\delta_\lambda = \lambda - 1$) и фазового ($\delta_\varphi = \varphi$) искажения сигнала при фиксированном значении безраз-

мерной частоты $\delta = 0,5$ от величины нормированных параметров n и δ ;

$$\delta_\lambda = \frac{\delta}{\sqrt{(9+16\delta^2)(4+n^2)}} - 1 \quad (9)$$

$$\delta_\varphi = -\text{arctg} \left[\frac{8\delta + 3n}{6 - 4\delta n} \right],$$

где $n = \frac{\tau_1}{\tau_2}$ - отношение постоянных времени апериодического (τ_1) и колебательного (τ_2) звеньев;
 δ - относительный коэффициент демпфирования колебательного звена.

На основе полученных во второй главе основных теоретических положений в третьей главе выявлены источники температурной неустойчивости характеристик и параметров поплавковых гиротакметров с ЭОС, произведена оценка степени температурной неустойчивости характеристик типовых приборов и определены необходимые и достаточные условия обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик гиротакметров.

Установлено, что на температурную неустойчивость характеристик поплавковых гиротакметров с ЭОС наибольшее влияние оказывает температурное изменение коэффициента жидкостного и конструкционного демпфирования, конструкционной жесткости и параметров усилителя электрической обратной связи.

Используя построенные во второй главе функции чувствительности частотных характеристик к вариациям параметров, показано, что поплавковые гиротакметры с ЭОС обладают наибольшей температурной неустойчивостью характеристик, достигающей нескольких десятков процентов на каждые 60°C изменения температуры. Поэтому задачу обеспечения температурной невозмущаемости характеристик требуется решать в первую очередь применительно к поплавковым гиротакметрам с ЭОС.

Анализ уравнений (7) показывает, что критерием температурной невозмущаемости характеристик ГТ с ЭОС является выполнение тождеств:

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} \equiv \frac{\partial a_2}{\partial t^0} \equiv \frac{\partial a_3}{\partial t^0} \equiv \frac{\partial K_1}{\partial t^0} \equiv 0 \quad (10)$$

Интегрируя тождества (10) с учетом начальных условий, определенных из выражений (8), получены необходимые условия обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик поплавковых ГТ с ЭОС.

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_{10} + \frac{k_{\partial x_0}}{k_{\text{по}}} - \frac{J_0 T_{20} k_{\partial x}}{J T_2 k_{\text{по}}} \\ T_2 &= \frac{T_{20}}{T_{20} \left(\frac{k_{\partial x_0}}{J_0} - \frac{k_{\partial x}}{J} \right) + 1} \\ k_n &= \frac{k_{\text{по}} \frac{J}{J_0}}{T_{20} \left(\frac{k_{\partial x_0}}{J_0} - \frac{k_{\partial x}}{J} \right) + 1} \\ k_{\text{нс}} &= \frac{H}{k_1 k_{\partial n}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Условия (11) обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик поплавковых ГТ являются общими и показывают, как требуется регулировать с изменением температуры параметры ЭОС, чтобы достичь температурной невозмущаемости характеристик прибора.

В дальнейшем на примере конкретной схемы ЭОС поплавкового ГТ решены вопросы физической и практической реализации найденных общих аналитических условий обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик прибора.

Показано, что применением четырех термокомпенсаторов R_{k1} ; R_{k2} ; R_{k3} ; R_{k4} в электрической обратной связи гиротакметра можно обеспечить выполнение общих условий (11). Определены

необходимы законы температурного регулирования сопротивлений термокомпенсаторов.

Для практической реализации термокомпенсаторов предложены достаточно простые двухполюсники, использующие в своем составе металлические и полупроводниковые терморезисторы.

Рассмотрены вопросы влияния электрической схемы безобогревной стабилизации на диапазон работы и точность измерения гиротаксометром угловых скоростей.

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования поплавкового гиротаксометра с электрической схемой безобогревной стабилизации характеристик прибора.

Объектом испытаний явился поплавковый гиротаксометр ГТ-1Б с ламповым усилителем Уо-57-4М в электрической обратной связи.

Экспериментальные исследования поплавкового гиротаксометра ГТ-1Б с ЭОС сводились к проведению совмещенных статических, динамических и климатических испытаний в режиме безобогревной стабилизации и с выключенной системой стабилизации.

Для реализации найденных в третьей главе законов температурного регулирования параметров термокомпенсаторов поплавкового ГТ был использован метод физического моделирования работы термокомпенсаторов.

При экспериментальных исследованиях были сняты семейства амплитудно-частотных характеристик прибора при различных температурах в условиях включенной и выключенной электрической системы безобогревной стабилизации.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что степень температурной нестабильности частотных характеристик в условиях выключенной системы безобогревной стабилизации составляет 14% на 35°C изменения температуры, а степень остаточной температурной нестабильности частотных характеристик прибора в условиях включенной электрической системы безобогревной стабилизации составляет 2% на 50°C изменения температуры. Таким образом, показано, что стабильность частотных характеристик поплавкового ГТ в условиях применения электрической системы безобогревной стабилизации увеличилась почти на порядок.

В четвертой главе дается общий анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов и приводятся конкретные

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} \equiv \frac{\partial a_2}{\partial t^0} \equiv \frac{\partial a_3}{\partial t^0} \equiv \frac{\partial K_1}{\partial t^0} \equiv 0 \quad (10)$$

Интегрируя тождества (10) с учетом начальных условий, определенных из выражений (8), получены необходимые условия обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик поплавковых ГТ с ЭОС.

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= T_{10} + \frac{k_{\partial x_0}}{k_{no}} - \frac{J_0 T_{20} k_{\partial x}}{J T_2 k_{no}} \\ T_2 &= \frac{T_{20}}{T_{20} \left(\frac{k_{\partial x_0}}{J_0} - \frac{k_{\partial x}}{J} \right) + 1} \\ k_n &= \frac{k_{no} \frac{J}{J_0}}{T_{20} \left(\frac{k_{\partial x_0}}{J_0} - \frac{k_{\partial x}}{J} \right) + 1} \\ k_{nc} &= \frac{H}{k_1 k_{\partial n}} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Условия (11) обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик поплавковых ГТ являются общими и показывают, как требуется регулировать с изменением температуры параметры ЭОС, чтобы достичь температурной невозмущаемости характеристик прибора.

В дальнейшем на примере конкретной схемы ЭОС поплавкового ГТ решены вопросы физической и практической реализации найденных общих аналитических условий обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик прибора.

Показано, что применением четырех термокомпенсаторов R_{k1} ; R_{k2} ; R_{k3} ; R_{k4} в электрической обратной связи гиротаксометра можно обеспечить выполнение общих условий (11). Определены

необходимы законы температурного регулирования сопротивлений термокомпенсаторов.

Для практической реализации термокомпенсаторов предложены достаточно простые двухполюсники, использующие в своем составе металлические и полупроводниковые терморезисторы.

Рассмотрены вопросы влияния электрической схемы безобогревной стабилизации на диапазон работы и точность измерения гиротометром угловых скоростей.

Четвертая глава содержит результаты экспериментального исследования поплавкового гиротометра с электрической схемой безобогревной стабилизации характеристик прибора.

Объектом испытаний явился поплавковый гиротометр ГТ-1Б с ламповым усилителем Ус-57-4М в электрической обратной связи.

Экспериментальные исследования поплавкового гиротометра ГТ-1Б с ЭОС сводились к проведению совмещенных статических, динамических и климатических испытаний в режиме безобогревной стабилизации и с выключенной системой стабилизации.

Для реализации найденных в третьей главе законов температурного регулирования параметров термокомпенсаторов поплавкового ГТ был использован метод физического моделирования работы термокомпенсаторов.

При экспериментальных исследованиях были сняты семейства амплитудно-частотных характеристик прибора при различных температурах в условиях включенной и выключенной электрической системы безобогревной стабилизации.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что степень температурной неустойчивости частотных характеристик в условиях выключенной системы безобогревной стабилизации составляет 14% на 35°C изменения температуры, а степень остаточной температурной неустойчивости частотных характеристик прибора в условиях включенной электрической системы безобогревной стабилизации составляет 2% на 50°C изменения температуры. Таким образом, показано, что стабильность частотных характеристик поплавкового ГТ в условиях применения электрической системы безобогревной стабилизации увеличилась почти на порядок.

В четвертой главе дается общий анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов и приводятся конкретные

рекомендации по конструктивному оформлению, выбору и расчету параметров электрической схемы безобогревной стабилизации характеристик гиротометров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований электрической безобогревной стабилизации характеристик поплавковых гиротометров сделаны следующие основные выводы:

1. Показано, что динамику гиротометра с электрической обратной связью, имеющей форсирующий контур, с учетом конечной жесткости конструкции достаточно точно описывает динамическая система третьего порядка.

Такую систему можно представить как последовательное соединение апериодического и колебательного звеньев, за исключением систем, для которых относительный коэффициент демпфирования не меньше единицы.

Быстродействие и степень амплитудного искажения такой системы определяются отношением постоянной времени апериодического звена к постоянной времени колебательного звена (n) и относительным коэффициентом демпфирования колебательного звена (δ).

Максимальное быстродействие при минимальном амплитудном искажении сигнала рассматриваемой системы достигаются при

$$n = \sqrt{2} \text{ и } n \cdot \delta = 1.$$

2. Для рассматриваемого класса гиротометров наибольшее влияние на температурную неустойчивость статических и динамических характеристик прибора оказывает изменение коэффициента жесткого и конструкционного демпфирования, конструкционной жесткости, и параметров усилителя электрической обратной связи.

Поплавковые гиротометры с электрической обратной связью обладают наибольшей температурной неустойчивостью характеристик, достигающей 20% + 40% на каждые 60°C изменения температуры.

3. Теоретически получены и экспериментально подтверждены величины параметров упруго-демпфирующей податливости основных соединений для типовых гиротометров. Конструкционная жесткость и коэффициент конструкционного демпфирования рассмотренных соеди-

нений находятся в пределах $(5+50) \cdot 10^5$ гсм и $(10+200)$ гсмсек соответственно. Коэффициент жидкостного демпфирования экваториальных колебаний поправка гироскопов с учетом его дополнительной степени свободы движения, обусловленной конечной жесткостью конструкции, достигает $(1+50)$ гсмсек.

Соединение "ротор-рамка" характеризуется меньшей жесткостью и меньшим коэффициентом конструкционного демпфирования, чем соединение "рамка-корпус".

Температурные зависимости конструкционной жесткости и конструкционного демпфирования соединений гироскопов представляют линейно падающие с ростом температуры прямые. Температурные коэффициенты указанных зависимостей, определяемые тангенсом угла наклона этих прямых, находятся в пределах $-(1+8) \cdot 10^{-8} 1/^\circ\text{C}$.

4. Показано, что система уравнений, определяющая зависимости от температуры постоянных времен форсирующего (T_1) и инерционного (T_2) звеньев, жесткости (K_n) электрической обратной связи и коэффициента подгоночного сопротивления (K_{nc}) является необходимым и достаточным условием обеспечения электрической безобогревной стабилизации характеристик гироскопа.

Анализ показал, что безобогревная стабилизация статического масштабного коэффициента прибора (K_{nc}) не зависит от температурной невозмущаемости динамических характеристик гироскопа ($T_1; T_2; K_n$).

5. С изменением температуры в пределах рабочего диапазона коэффициент подгоночного сопротивления (K_{nc}) и постоянную времени (T_1) форсирующего звена электрической обратной связи почти не требуется регулировать. Глубина температурной регулировки указанных параметров не превышает 2+3 %.

Глубина температурного регулирования жесткости (K_n) и постоянной времени (T_2) инерционного звена электрической обратной связи на один-два порядка больше.

6. Аналитически показано, что найденные условия электрической безобогревной стабилизации характеристик гироскопа могут быть реализованы с помощью простых двухполюсников.

Температурные характеристики $R_{k1}(t^\circ)$ и $R_{k2}(t^\circ)$ двухполюсников, обеспечивающих выполнение условий температурного регулирования коэффициента (K_{nc}) подгоночного сопротивления и постоянной времени (T_1) форсирующего звена электрической обратной связи, близки к слабо возрастающим с увеличением температуры

прямым линиям. Температурный коэффициент, определяющий крутизну наклона указанных прямых линий, лежит в пределах $(1+5) \cdot 10^{-8} 1/^\circ\text{C}$.

Температурные характеристики $R_{k2}(t^\circ)$ и $R_{k3}(t^\circ)$ двухполюсников, обеспечивающих выполнение условий температурного регулирования постоянной времени (T_2) инерционного звена и жесткости (K_n) электрической обратной связи, близки к экспоненциальным законам, требующим с возрастанием температуры в пределах рабочего диапазона уменьшения сопротивлений компенсаторов в несколько раз.

7. Использование в поплавковом гироскопе электрической системы безобогревной стабилизации по разработанной схеме снижает температурную нестабильность характеристик прибора с 20% до 2% при изменении температуры на 50°C .

8. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что электрическая безобогревная стабилизация характеристик поплавкового гироскопа легко реализуема, не требует существенных изменений в конструкции прибора, обладает достаточно высокой надежностью и долговечностью в энергопотреблении, снижает общее время готовности прибора к работе и т.д.

Основные материалы диссертационной работы доложены на XXXIX-XXXIII научно-технических конференциях СПИ в 1966-1971 гг; на II и III Саратовской областной конференциях молодых ученых в 1969, 1970 гг; на Всесоюзной Юбилейной научной конференции в СВКИУ в 1970 г. и опубликованы в следующих работах:

1. П р о с к у р я к о в Г.М. и др. Влияние нестабильности рабочих зазоров датчиков угла на показания гироскопов. Научные труды СПИ, вып. 23, Саратов, 1966.
2. П р о с к у р я к о в Г.М. Вопросы безобогревной стабилизации параметров гироскопов. Материалы XXX научно-технической конференции СПИ. Саратов, 1967.
3. П р о с к у р я к о в Г.М., Д а в и д е н к о Г.М. К определению динамических характеристик поплавкового гироскопа с электрической пружиной. Научные труды СПИ, вып. 43, Саратов, 1969.

4. П р о с к у р я к о в Г.М., Д а в и д е н к о Г.М. Без-
обогревная стабилизация динамических параметров гиротакметров
с электрическим и жидкостным демпфированием. Научные труды СПИ,
вып.43. Саратов, 1969.

5. П р о с к у р я к о в Г.М. и др. Влияние динамических
погрешностей элементов электрической пружины на показания гиро-
такметра. Научные сообщения (тезисы докладов) XXIX научно-
технической конференции СПИ, Саратов, 1969.

6. П р о с к у р я к о в Г.М. Параметрическая компенсация
температурных погрешностей поплавкового гиротакметра. Материалы
юбилейной научной конференции МО СССР. 1970.

7. П р о с к у р я к о в Г.М. и др. Экспериментальное иссле-
дование упругой податливости элементов конструкции гиротакметров.
Труды II Саратовской областной конференции молодых ученых. Изд-во
СГУ, Саратов, 1969.

8. П р о с к у р я к о в Г.М. К расчету крутизны характери-
стики четырехполюсного микросина. Труды III Саратовской областной
конференции молодых ученых. Саратов, 1970.

Герман Михайлович Проскуряков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БЕЗОБОГРЕВНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОТАКМЕТРОВ

Автореферат

Ответственный за выпуск Б.С.Орлов

Корректор Л.А.Мишина

НГ29/32 Подписано к печати 10/II-1971. Печ. л. 1.

Заказ 736 Тираж 150 экз.

СПИ. Ротапринт. Саратов, Политехническая, 77.