

## **МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ**

### **Введение**

В настоящее время в системах управления летательных аппаратов различного типа используются инерциальные навигационные системы, датчиками первичной информации для которых служат гироскопы и акселерометры. Основным показателем эффективности таких систем является скорость нарастания ошибки определения координат местоположения объекта, непосредственно зависящая от совокупной погрешности измерений инерциальных датчиков и, в частности, от величины дрейфа гироскопов. Для повышения точности инерциальных систем в заводских условиях проводится калибровка датчиков, в процессе которой определяются параметры математической модели систематической погрешности измерений. Эта модель используется в дальнейшем в ходе эксплуатации системы с целью компенсации ошибок измерений и, как следствие, повышения точности функционирования навигационной системы и управления.

Вопросы разработки новых и совершенствования существующих методик калибровки инерциальных датчиков и модулей не перестают быть актуальными [1], [2]. Это объясняется тем, что в них должны учитываться возможности имеющегося лабораторного оборудования и метрологического обеспечения, тип и класс точности калибруемых датчиков, возможность автоматизации процесса калибровки и уменьшения ее продолжительности, технологические и организационные аспекты.

В статье излагается разработанная и реализованная методика планирования калибровочных испытаний датчиков угловой скорости (ДУС) оптического типа, учитывающая требования по назначению, а также специфические организационные и технологические требования.

### **Постановка задачи**

Требуется разработать и реализовать методику планирования и проведения тепловых испытаний ДУС с целью определения в дальнейшем математической модели дрейфа, зависящего от температуры, причем внешняя эксплуатационная температура (температура внешней среды)

может принимать значения от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$  и меняться в этом диапазоне с различной скоростью (требования по назначению).

### **Обсуждение задачи**

Для определения в дальнейшем параметров математической модели теплового дрейфа необходимо спланировать и провести калибровочные испытания прибора, поместив его в тепловую камеру с регулируемой температурой, во время которых зафиксировать текущие обновляемые измерения ДУС и его внутренней температуры. Путем обработки полученного избыточного объема данных определяются параметры аппроксимирующей модели, наилучшие в некотором смысле.

Не касаясь в данной статье конкретного вида используемой математической модели теплового дрейфа ДУС, а также особенностей реализации алгоритма обработки экспериментальных данных, остановимся на вопросах планирования калибровочных экспериментов.

Перечислим общие и специальные требования, предъявляемые к калибровочным испытаниям, и которые должны быть учтены при планировании методики их проведения:

- объем и состав измерений должен быть достаточным для определения достоверных значений параметров математической модели теплового дрейфа ДУС во всех допустимых эксплуатационных условиях (формальное требование);
- продолжительность одного эксперимента не должна превышать 9 часов (организационное требование);
- максимально допустимые скорости нагрева и охлаждения рабочей области камеры ограничены, а сама температура может меняться по линейному закону с задаваемой скоростью (инструментальное требование);
- в начале и в конце эксперимента температура в камере должна быть  $20^{\circ}\text{C}$  (технологическое требование).

### **Решение задачи**

В процессе предварительных тепловых исследований нескольких экземпляров прибора подобного типа получено следующее:

- в общем случае величина дрейфа (ошибки измерения) ДУС зависит как от температуры, так и от скорости ее изменения – градиента температуры. Причем зависимость удовлетворительно аппроксимируется полиномиальной функцией от двух переменных – температуры и градиента, не выше третьего порядка;
- при быстрой смене температуры рабочего пространства камеры или внешней температуры, внутренняя температура прибора, независимо

от величины скачка внешней температуры, выходит на новое установившееся значение примерно за 2 часа.

С учетом отмеченных фактов был проведен анализ требований, предъявляемых к калибровочному эксперименту. В результате анализа установлено, что вследствие функциональных ограничений камеры, организационных и технологических требований получить в одном эксперименте данные в объеме достаточном для определения достоверных значений параметров модели 3-го порядка невозможно.

В этих условиях предложено весь эксплуатационный температурный диапазон разбить на 4 поддиапазона (рис. 1), для каждого из которых определяется свой набор параметров модели.

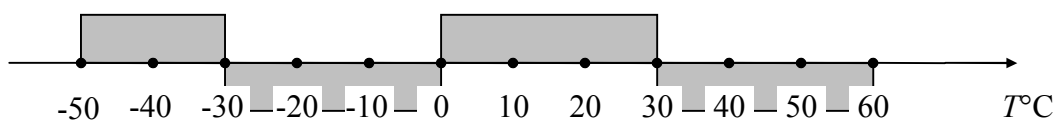


Рис. 1. Разделение всего температурного диапазона на 4 рабочих области модели

Таким образом, каждый поддиапазон является рабочей областью для модели со своим набором параметров. Длина первого поддиапазона составляет 20°C; второго, третьего и четвертого – по 30°C. Размер рабочей области выбран с учетом продолжительности эксперимента – 9 часов, так, чтобы для каждой области был получен в одном эксперименте набор измерений достаточного объема и информативности.

Для повышения эффективности аппроксимирующей модели калибровочный эксперимент для каждой рабочей области, за исключением крайних, проводится в температурном диапазоне, расширенном на 10°C влево и на 10°C вправо. Таким образом, рабочая область модели лежит внутри области аппроксимации. Это сделано с той целью, чтобы не допустить использования «загибов» аппроксимирующей полиномиальной функции, которые могут иметь место на краях области аппроксимации.

По числу выделенных рабочих областей модели спланируем четыре эксперимента, задачей каждого из которых является получение измерений ДУС в температурной области аппроксимации при различных значениях градиента внутренней температуры.

План проведения эксперимента представляет собой программу желаемого изменения температуры тепловой камеры, в которую помещен работающий ДУС. Продолжительность этой программы должна быть не более девяти часов, при этом нагрев и охлаждение могут осуществляться с ограниченной скоростью. Учитывая порядок аппроксимирующей модели (третий) и количество модельных параметров, подлежащих определению, необходимо обеспечить проход всего температурного диапазона рабочей

области модели или, по крайней мере, его существенной части, не менее шести раз с разным значением градиента температуры.

Составить план эксперимента, учитывающий перечисленные условия, можно только с помощью математического моделирования теплового процесса внутри блока. Известные технологии моделирования тепловых процессов в гироскопах оптического типа [3], [4] трудоемки, ресурсозатратны, требуют значительного объема эвристической информации и экспериментальных данных, подтверждающих достоверность [5]. Учитывая ограниченность решаемой здесь задачи, а именно, необходимость спрогнозировать поведение температуры и градиента в единственной точке локализации внутреннего термодатчика прибора, представляется возможным разработать и применить упрощенную модель управляемого динамического процесса установления внутренней температуры в зависимости от регулируемой внешней температуры камеры.

Пусть  $T(t)$  – внутренняя температура прибора,  $T_k(t)$  – кусочно-линейная функция изменения температуры в камере (внешняя температура). Учитывая экспериментально полученный характер изменения внутренней температуры при скачкообразном изменении внешней температуры, введена следующая дифференциальная модель

$$\tau \cdot \frac{dT(t)}{dt} + T(t) = T_k(t) + \Delta T,$$
$$\frac{dT_k(t)}{dt} = U(t),$$

в которой  $U(t)$  – искомая кусочно-постоянная функция управления внешней температурой, причем  $-1^\circ\text{C}/\text{мин} \leq U \leq 3^\circ\text{C}/\text{мин}$  (данные соответствуют термокамере Espes SET-Z-032U);

$\tau = 2400$  – постоянная времени, согласованная с результатами предварительного эксперимента;

$\Delta T$  – постоянная величина, соответствующая так называемому перегреву прибора, вызванному внутренним источником тепловой энергии;

краевые условия  $T(0) = T_k(0) = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_k(t = 9 \text{ часов}) \approx 20^\circ\text{C}$ .

В результате решения задачи следует найти кусочно-постоянную функцию  $U(t)$ , удовлетворяющую ограничениям и обеспечивающую выполнение краевых условий, а также требуемую избыточность измерений. Под требуемой избыточностью понимается наличие некоторого объема измерений прибора при фиксированной температуре и нескольких (до 6) различных значениях градиента.

Очевидно, что сформулированная задача может иметь не единственное решение в силу того, что строго не формализовано понятие

«требуемая избыточность». В этих условиях для получения приемлемого решения использовалось численное моделирование и полуэвристический подход к заданию управляющей функции. В результате получены следующие программы изменения внешней температуры (рис. 2, рис. 3). По оси абсцисс отложено время в минутах, по оси ординат – регулируемая температура в камере в °С. Каждый из четырех экспериментов обеспечивает получение измерений в соответствующей рабочей области модели.

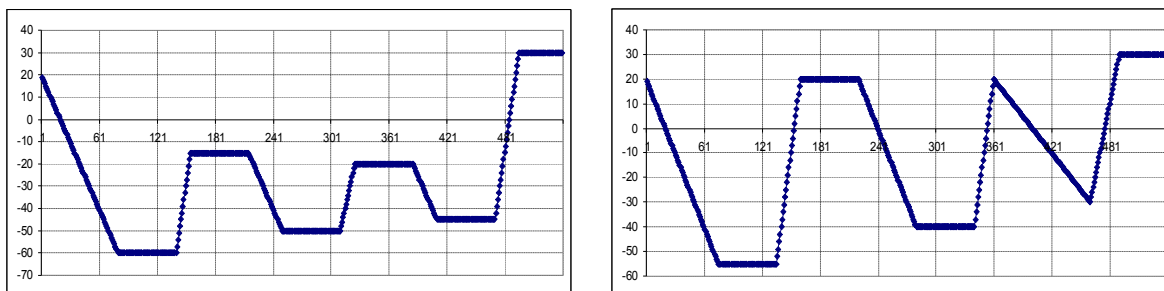


Рис. 2. Программа изменения внешней температуры в первом и втором экспериментах

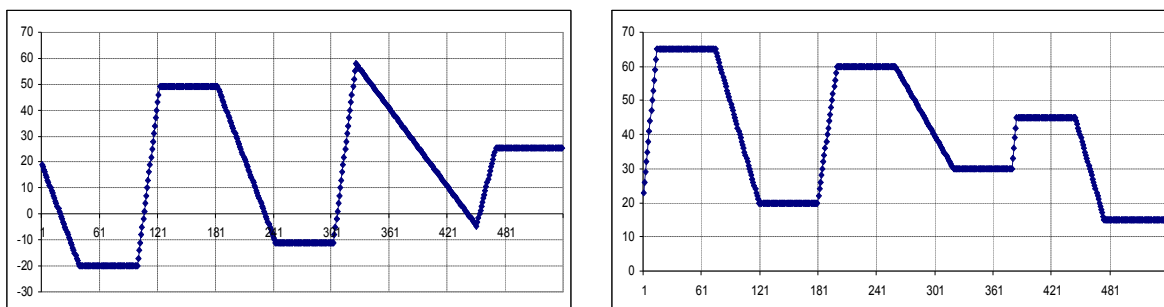


Рис. 3. Программа изменения внешней температуры в третьем и четвертом экспериментах

Для более полной характеристики динамического процесса отобразим внутреннюю температуру, полученную путем моделирования, на фазовой плоскости (рис. 4). На рис. 4 по оси абсцисс отложена внутренняя температура ДУС в °С, по оси ординат – ее градиент в °С/мин.

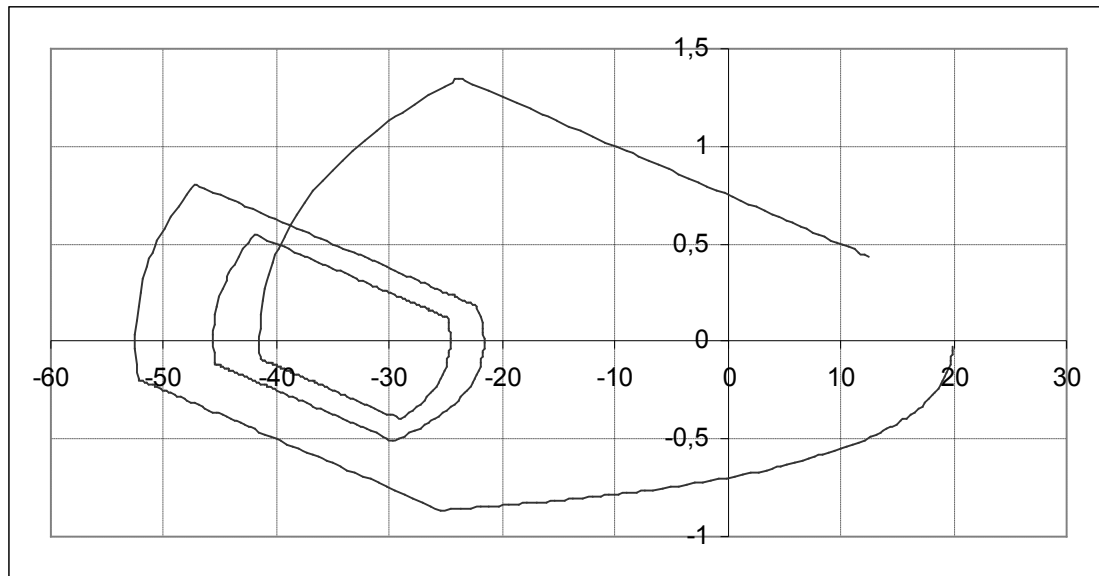


Рис. 4. Фазовый портрет планируемого изменения внутренней температуры в первом эксперименте

Прокомментируем рисунок. Температура в камере меняется так, как показано на рис. 2 (слева). В исходном состоянии температура камеры и прибора  $+20^{\circ}\text{C}$ , затем прибор охлаждается до  $-52^{\circ}\text{C}$ , после чего следуют три цикла нагрева и два цикла охлаждения. Рабочая область модели составляет  $[-50^{\circ}\text{C}; -30^{\circ}\text{C}]$ , область аппроксимации  $[-52^{\circ}\text{C}; -20^{\circ}\text{C}]$ . Измерения, не попадающие в область аппроксимации, при постобработке данных игнорируются.

Судя по фазовой траектории, информативность эксперимента в рабочей области модели достаточная для построения аппроксимационной модели 3-го порядка. Присутствует целый диапазон температур  $[-42^{\circ}\text{C}; -30^{\circ}\text{C}]$ , для которых имеются по 6 точек, соответствующих различным значениям градиента.

### Результаты эксперимента

Для подтверждения эффективности методики планирования, полученные программы изменения внешней температуры (рис. 2, рис. 3) были реализованы экспериментально. В ходе проведенных четырех экспериментов получены измерения термодатчика внутренней температуры прибора. По этим измерениям с использованием фильтра Калмана синтезирована оценка градиента температуры. Результаты отображены в виде соответствующих фазовых траекторий (рис. 5, рис. 6). Для наглядности эти траектории совмещены с аналогичными расчетными траекториями, полученными моделированием. Последние отображены на рисунках более тонкими линиями.

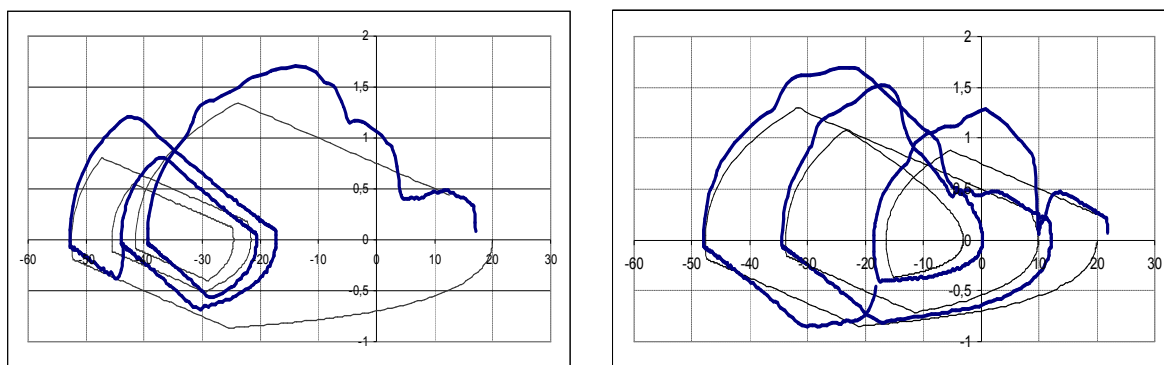


Рис. 5. Экспериментальная и расчетная фазовые траектории в первом и втором экспериментах

Запись измерений в первом эксперименте началась при  $-43^{\circ}\text{C}$ , закончилась при  $+18^{\circ}\text{C}$ , во втором при  $-18^{\circ}\text{C}$  и  $+22^{\circ}\text{C}$  соответственно.

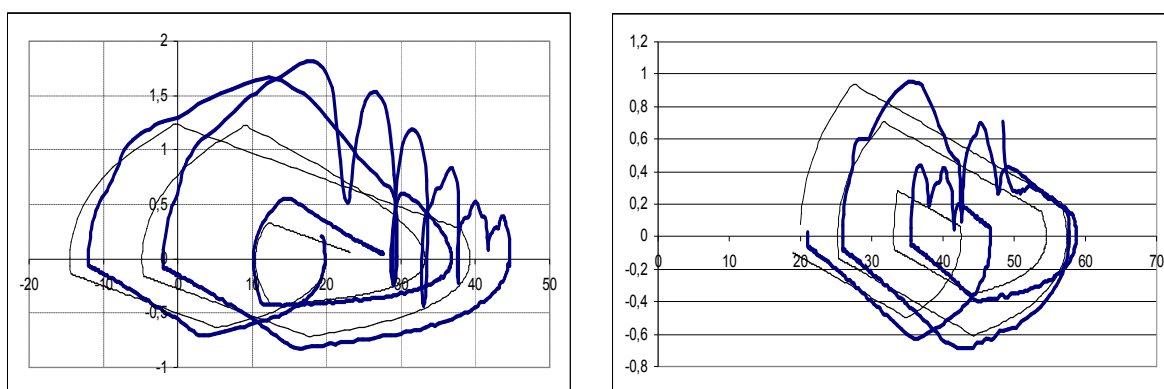


Рис. 6. Экспериментальная и расчетная фазовые траектории в третьем и четвертом экспериментах

Запись измерений в третьем эксперименте началась при  $+20^{\circ}\text{C}$ , закончилась при  $+27^{\circ}\text{C}$ ; в четвертом – при  $+50^{\circ}\text{C}$  и  $+20^{\circ}\text{C}$  соответственно. Петлеобразный характер экспериментальной фазовой траектории в третьем эксперименте связан с особенностями работы системы стабилизации температуры в камере. Система не обеспечила линейный характер изменения температуры, при этом нагрев чередовался с охлаждением. Аналогичные сбои в системе стабилизации имели место и в других экспериментах.

## Выводы

Судя по экспериментальной фазовой траектории, можно утверждать:  
 – в каждом из экспериментов рабочая область модели охвачена измерениями полностью, причем проход области осуществляется

многократно с различными значениями градиента. Таким образом, информативность экспериментов достаточная;

- продолжительность каждого эксперимента не превышает 9 часов;
- четыре эксперимента обеспечивают получение требуемых измерений ДУС, в должном объеме и во всем эксплуатационном диапазоне температур;
- разработанная методика планирования калибровочных экспериментов, основанная на использовании упрощенной динамической модели теплового процесса и решении задачи управления, достаточно эффективна, что следует из сопоставления экспериментальной фазовой траектории с расчетной.

Представленные материалы могут быть использованы при проведении калибровок инерциальных датчиков и инерциальных модулей различного типа и назначения.

### **Список использованной литературы**

1. *Волынский Д. В.* Калибровка волоконно-оптических гироскопов в составе бескарданных инерциальных измерительных модулей // Д. В. Волынский, Е. В. Драницына, А. А. Одинцов, А. А. Унтилов / Гироскопия и навигация. – 2012. – №2 (77). – С.56-68.
2. *Емельянец Г.И.* О калибровке бескарданного инерциального измерительного модуля на ВОГ в условиях стенда // Г. И. Емельянец, Е. В. Драницына, Б. А. Блажнов / Гироскопия и навигация. – 2012. – №3 (78). – С.55-63.
3. *Джашитов В.Э.* Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем // В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов / – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – 150с.
4. *Погорелов С. Ю.* Температурное поле резонатора кольцевого лазерного гироскопа при различной конфигурации теплоотводящих элементов // С. Ю. Погорелов, К. Ю. Счастливец и др. / Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2005. – №20. – С.3-8.
5. *Погорелов С.Ю.* Уточнение расчетной модели кольцевого лазерного гироскопа на основе экспериментальных данных. // С. Ю. Погорелов, К. Ю. Счастливец / Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2005. – №47. – С.153-158.