

На правах рукописи

Бондаренко Галина Джалаловна

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ ПРИ КОНТРОЛЕ И КОРРЕКЦИИ
ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ

Специальность 05.13.14 – "Системы обработки информации и управления"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск - 1997

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете

Начный руководитель — доктор технических наук, профессор
Тверсков М.М.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Шипицын А.Г.,
кандидат технических наук, доцент
Кошечев А.А.

Ведущее предприятие — Государственный ракетный центр "Конструкторское бюро имени академика В.П.Макеева".

Защита состоится 11 июля 1997 г., в 15 часов, на заседании диссертационного совета Д053.13.06 по присуждению ученых степеней в Челябинском государственном техническом университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Челябинского государственного технического университета.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим высылать по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76, ЧГТУ, ученый совет, т. 39 91 23.

Автореферат размещен " " мая 1997 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, доктор технических наук,
профессор



Устюгов М.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Основными массогеометрическими характеристиками (МГХ) твердого тела, полностью определяющими его поведение, являются масса, три координаты центра масс, три осевых и три центробежных момента инерции в заданной системе координат. Наиболее полно и жестко регламентируются МГХ летательных аппаратов (ЛА). Задача обеспечения требуемых МГХ ЛА включает задачу измерения МГХ с заданной точностью и задачу коррекции МГХ до допустимых значений присоединением добавочных масс.

Актуальность темы. Задача измерения МГХ в настоящее время решается путем использования разнородного оборудования с многократными переустановками изделия. Процесс измерения МГХ характеризуется большой длительностью и трудоемкостью. Кроме того, вследствие погрешностей базирования измерение МГХ на различных стендах производится фактически относительно разных систем координат, что приводит к дополнительным погрешностям измерений. Требования же к точности измерения МГХ постоянно повышаются, и выполнение этих требований в рамках существующих методик оказывается невозможным. Для обеспечения необходимой точности определения МГХ требуется разработка специального оборудования, сочетающего использование высокоточных измерительных методов и комплексность измерений, т.е. получение информации обо всех регламентируемых характеристиках на одном стенде при минимальном числе переустановок изделия.

На основе измеренных значений МГХ изделия ставится задача расчета величин и координат корректирующих масс, обеспечивающих введение МГХ в допустимые интервалы. Такая система корректирующих масс должна удовлетворять ограничениям на их размещение, которые накладываются конструкцией ЛА, и отвечать требованию минимизации суммарной массы, которое диктуется особенностями данного класса изделий. Сложность решения поставленной задачи заключается в невозможности аналитического задания части ограничений на регламентируемые МГХ. Существующие в настоящее время методы поиска оптимальной системы корректирующих масс не гарантируют нахождения решения во всех случаях, когда оно существует, либо обеспечивают коррекцию до допустимых величин лишь части МГХ.

Цель работы. Работа посвящена повышению точности измерения и эффективности коррекции МГХ летательных аппаратов. Для этого были поставлены и решались следующие задачи:

1) повышение точности определения параметров динамической неуравновешенности изделия относительно его продольной оси на основе совершенствования методов обработки измерительной информации;

2) теоретическое обоснование и разработка методик получения и обработки дополнительной информации о параметрах распределения массы изделий в режимах угловых колебаний;

3) поиск путей решения задачи коррекции МГХ изделий до допустимых значений при минимальной суммарной величине корректирующих масс и заданных ограничениях на их размещение;

4) реализация результатов исследований в виде алгоритмов и программ для системы, включающей стенд для комплексного определения МГХ и персональный компьютер IBM PC.

Научная новизна. Впервые предложена методика определения параметров динамической неуравновешенности изделий при изменении угловой скорости их вращения на основе произвольной модели этого изменения. Обоснована математическая модель затухания угловой скорости вращения под действием сил сопротивления среды и сил трения в отсутствие действия привода вращения. Разработаны методики и алгоритмы обработки измерительной информации для определения параметров модели затухания и определения МГХ изделий на базе предложенной модели.

Рассмотрена работа стенда в режиме совмещенного (физического и крутильного) маятника. Предложена новая методика, позволяющая определять продольную координату центра масс, два осевых и один центробежный момент инерции изделия на основе обработки измерительной информации о периодах колебаний и силах динамических воздействий на ось качания.

Предложен новый способ решения многопараметрической нелинейной оптимизационной задачи коррекции МГХ при неаналитическом задании части ограничений. Обоснован метод выбора начальной системы корректирующих масс, обеспечивающей полную симметрию распределения массы изделия относительно координатных плоскостей. Предложена методика поэтапной оптимизации корректирующей системы для введения в допустимые интервалы всех регламентируемых МГХ изделия при минимизации суммарной добавочной массы.

Научная и практическая ценность. В настоящей работе теоретически обоснованы и разработаны высокоточные методы сбора и обработки измерительной информации о МГХ изделий машиностроения. Использование результатов работы позволило:

– уменьшить погрешности определения параметров динамической неуравновешенности изделий за счет моделирования и учета в алгоритме об-

работки информации факторов, ограничивающих точность измерений;

- производить измерение всех МГХ изделий на одном стенде за счет обоснования и реализации методов определения МГХ в дополнительных режимах работы стенда;

- на основе полученной информации о МГХ изделий определять в режиме автоматического поиска величины и координаты добавочных масс, обеспечивающих коррекцию МГХ до допустимых значений при минимальной суммарной массе.

Описанные в настоящей работе методики и алгоритмы сбора и обработки измерительной информации об МГХ изделий реализованы в управляющей программе микропроцессорной системы стенда для комплексного контроля распределения масс ЛА и прикладной программе для персонального компьютера IBM PC. Прикладная программа, работающая в среде Windows, реализует предварительную проверку возможности коррекции МГХ изделия, определение начального приближения для системы корректирующих масс, автоматический и полуавтоматический поиск системы корректирующих масс, обеспечивающих введение МГХ изделий в допустимые интервалы.

Результаты работы в области измерения параметров динамической неуравновешенности могут быть использованы для решения широкого круга задач. В частности, они были внедрены на предприятиях, выпускающих бесприводные балансировочные стайки (НПП "Монитор-механик" и ПО "Аргон"), и позволили осуществлять высокоточную динамическую балансировку широкого спектра роторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на первой Всероссийской научно-технической конференции "Балансировочная техника" (г. Москва, 1994 г.), на научно-технических конференциях ЧГТУ (г. Челябинск, 1993-1995 г.), на научно-технической конференции ЧГТУ с участием представителей предприятий ракетно-космической отрасли (г. Челябинск, 1996 г.). Часть результатов диссертации была представлена на конкурс "Молодые дарования" Российской академии наук (1996 г.) в работе "Обеспечение допустимых значений массогеометрических характеристик изделий машиностроения", которая была удостоена диплома лауреата.

Публикации. Результаты исследований опубликованы в 6 печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения и списка литературы. Основная часть работы изложена на 140 стр., содержит 27 рис., 3 таблицы. Список литературы включает в себя 85 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и основные положения, составляющие научную новизну и выносимые на защиту. Намечены основные этапы обработки информации при контроле и коррекции распределения масс летательных аппаратов, представленные в виде схемы на рис.1.

1. ОБЗОР МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В первой главе вводятся основные массогеометрические характеристики (МГХ) изделий машиностроения, обосновывается необходимость их высокоточного и полного контроля для летательных аппаратов. Рассматриваются основные существующие методы и оборудование для контроля распределения масс, подчеркивается необходимость комплексного контроля МГХ на одном стенде. Приводится описание стенда для комплексного контроля МГХ и ставятся задачи разработки и реализации корректных методов сбора и обработки измерительной информации.

Основными МГХ изделий машиностроения являются масса (M), координаты центра масс (x_C, y_C, z_C) и шесть компонент тензора инерции: три осевых (J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}) и три центробежных (J_{xy}, J_{yz}, J_{zx}) момента инерции, определенные в декартовой прямоугольной системе координат $Oxyz$, связанной с геометрическими элементами изделия (см. рис.2). Наиболее полно и жестко регламентируются МГХ летательных аппаратов (ЛА). Для них важно обеспечить заданную угловую ориентацию главных центральных осей инерции (ГЦОИ) ($SXYZ$ на рис.2) и определенные значения моментов инерции в системе ГЦОИ, т.е. значения главных центральных моментов инерции (ГЦМИ). У ЛА и их узлов, представляющих собой тела вращения, регламентируется угол λ отклонения продольной ГЦОИ от оси геометрической симметрии. В некоторых случаях целесообразно также задавать ограничения на положение одной из поперечных осей инерции, например, на угол ν на рис.2. Таким образом, регламентируемыми МГХ ЛА являются: масса (M), координаты центра масс (x_C, y_C, z_C или $x_C, \rho = \sqrt{y_C^2 + z_C^2}$), углы ориентации ГЦОИ (λ, ν) и величины ГЦМИ (J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}).

Непосредственное измерение шести последних регламентируемых МГХ ЛА реализовать затруднительно. Их определяют косвенно через десять основных МГХ. Это означает, что точность измерения всех основных МГХ

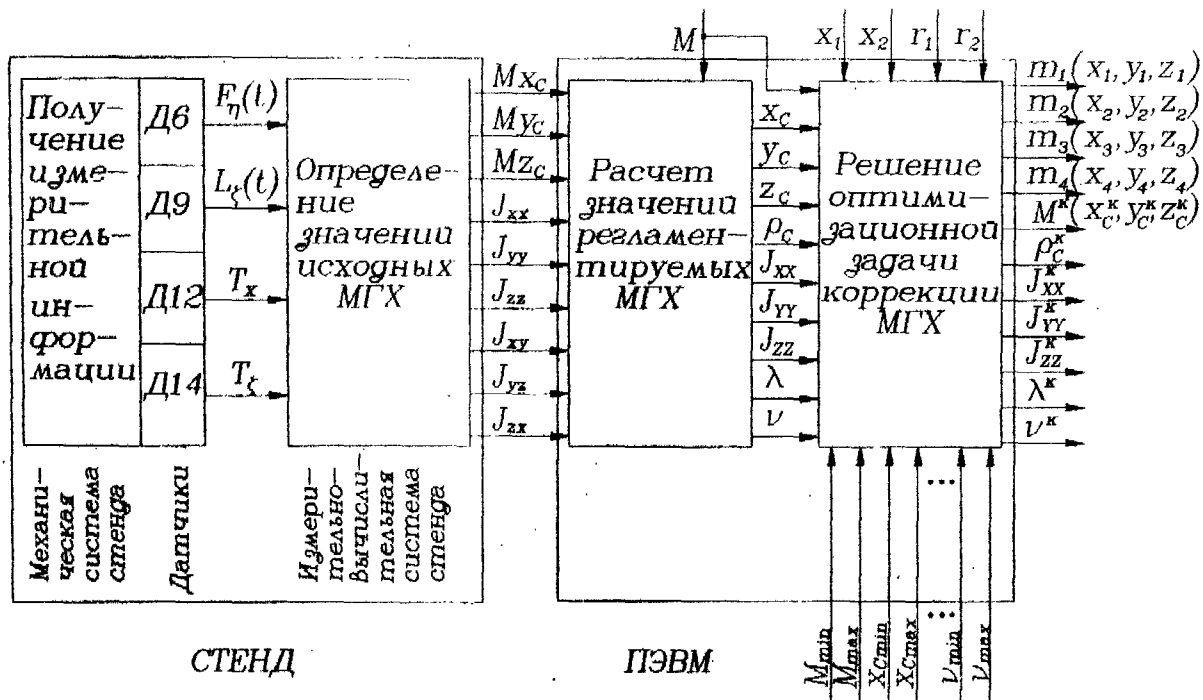


Рис.1. Схема обработки информации при контроле и коррекции распределения масс изделий

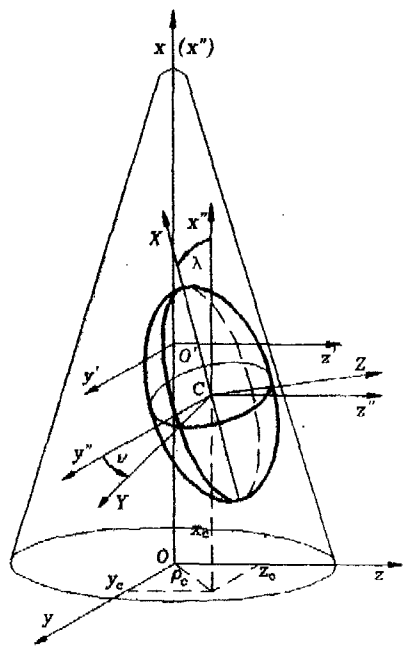


Рис.2. Системы координат изделия

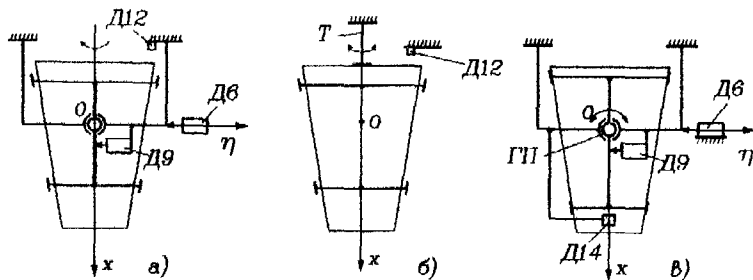


Рис.3. Режимы работы стенда

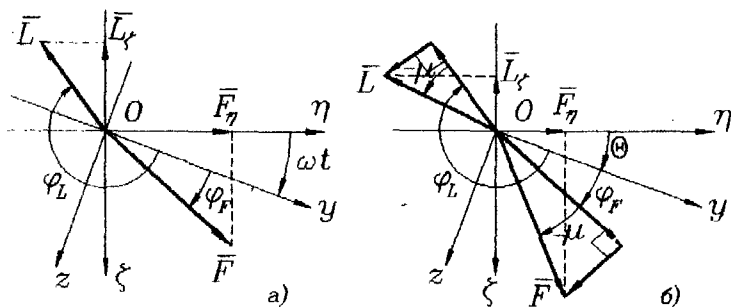


Рис.4. Силы и моменты при вращении изделия

должна быть очень высокой, включая точность тех из них, которые не входят в число регламентируемых или ограничены относительно менее жестко.

В настоящее время для контроля МГХ используется оборудование следующих видов:

- 1) весы для измерения массы;
- 2) стенды для определения координат центра масс, использующие принцип уравновешивания и измерения моментов силы тяжести изделий;
- 3) стенды для определения моментов инерции, позволяющие измерять осевые моменты инерции относительно шести осей, пересекающихся в одной точке, на основании которых вычисляются компоненты тензора инерции в этой точке;
- 4) стенды, использующие принцип динамической балансировки и позволяющие измерять две координаты центра масс и два центробежных момента инерции.

Использование разнородного оборудования с многократными переустановками изделия приводит к тому, что процесс измерения МГХ характеризуется большой длительностью и трудоемкостью. Кроме того, вследствие погрешностей базирования измерение МГХ на различных стендах производится фактически относительно разных систем координат, что приводит к дополнительным погрешностям измерений. Требования же к точности измерения МГХ постоянно повышаются. Для их обеспечения на кафедре АМСП ЧГТУ был разработан специализированный стенд для комплексного контроля распределения масс ЛА. Стенд может работать в трех режимах:

1) в режиме динамической балансировки изделие устанавливается в газостатические подшипники корпуса и раскручивается пневматическим приводом вращения до требуемой угловой скорости. После отвода привода вращения производится измерение динамических воздействий вращающегося неуравновешенного изделия на ось вращения — т.е. измерение главного вектора (датчиком Д6) и главного момента (датчиком Д9) сил инерции, приведенных к полюсу O (см. рис.3,а). С помощью фотоэлектрического датчика Д12 производится измерение периода вращения. В этом режиме определяются величины y_C, z_C, J_{xy}, J_{xz} ;

2) в режиме малых колебаний относительно вертикальной оси к изделию присоединяется нижний конец торсиона T (см.рис.3,б). Изделие в газостатических подшипниках корпуса поворачивается на небольшой угол вокруг оси Ox и отпускается без начальной угловой скорости. С помощью фотоэлектрического датчика Д12 измеряется период крутильных колебаний изделия, на основании которого определяется величина J_{xz} ;

3) в режиме малых колебаний относительно горизонтальных осей сжатый воздух в подшипники корпуса не подводится. Изделие жестко фиксиру-

ется в корпусе в положениях, при которых оси изделия Oz , Oy и биссектриса угла yOz поочередно совпадают с осью газостатических подшипников ГП (см. рис.3,в) В каждом случае корпус с изделием отклоняется на малый угол и совершает угловые колебания вокруг оси подшипников ГП под действием сил упругости торсиона, ось которого совпадает с осью подшипников, и силы тяжести. С помощью фотоэлектрического датчика Д14 измеряется период колебаний, с помощью датчика Д9 – их угловая амплитуда, а с помощью датчика Д6 – горизонтальная составляющая динамического воздействия корпуса с изделием на ось качания. В этом режиме определяются величины J_{zz} , J_{yy} , J_{yz} и x_C .

Исследования режима динамической балансировки широко представлены в литературе, например, в работах В.А.Шепетильникова. Параметры динамической неуравновешенности обычно определяются на основе гармонического анализа сигналов силоизмерительных датчиков, установленных в двух плоскостях измерения. Особенность режима динамической балансировки, реализованного на рассматриваемом стенде, состоит в том, что с целью исключения возмущающего действия привода вращения получение измерительной информации производится при отведенном приводе. При этом происходит затухание угловой скорости вращения изделия под действием сил трения в подшипниках и сил сопротивления воздуха, особенно при наличии у изделия или у оснастки, с помощью которой оно крепится на стенде, выступающих элементов.

Проблемы неравномерности угловой скорости вращения изделий при определении параметров динамической неуравновешенности рассмотрены в работах Ю.А.Самсаева. Им предложены также схемотехнические решения измерительных систем балансировочных станков, позволяющие формировать опорный сигнал, с помощью которого производится гармонический анализ сигналов с силоизмерительных датчиков, синхронный с вращением изделия. Данный подход может быть применен и в случае затухающего вращения. Он, однако, позволяет лишь частично учитывать влияние изменения угловой скорости на измеряемые параметры, так как помимо переменной частоты сигналы датчиков характеризуются также переменными амплитудами и переменными компонентами фаз.

В настоящей работе ставится задача всестороннего учета изменения угловой скорости вращения при обработке измерительной информации в режиме динамической балансировки.

Режим малых колебаний относительно вертикальной оси мало отличается от режима унифилярного подвеса, исследованного в работах М.М.Гернета.

В режиме малых колебаний относительно горизонтальных осей на код-

пус с изделием действует сила тяжести и силы упругости торсиона. Данный режим совмещенного (крутильного и физического) маятника в таком виде, как он реализован на стенде, является новым измерительным режимом и требует глубокого исследования. В настоящей работе ставятся задачи исследования режима совмещенного маятника, получения зависимостей, связывающих параметры, доступные для измерения в этом режиме, с параметрами распределения масс, и разработки методов и алгоритмов получения при преобразовании измерительной информации для определения искомых МГХ изделий.

2. ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ

Во второй главе рассматривается методика определения параметров динамической неуравновешенности (статических моментов и центробежных моментов инерции изделия относительно оси вращения), анализируются основные факторы, ограничивающие точность измерений. Представлена новая методика обработки измерительной информации для определения параметров динамической неуравновешенности в условиях затухания угловой скорости вращения изделия на основе моделирования закона изменения угловой скорости. Данная методика включает определение параметров модели для каждого экземпляра изделия и учитывает искажение сигналов при прохождении через фильтры измерительной системы.

В режиме динамической балансировки изделие, связанные с ним координатные оси Oy и Oz , а также главный вектор \vec{F} и вектор главного момента \vec{L} сил инерции, приведенных к центру O , вращаются вокруг вертикальной оси Ox (см. рис.4), ось Ox перпендикулярна плоскости рисунка). Сигнал датчика Д6 (см. рис.3.а) пропорционален проекции вектора \vec{F} на неподвижную ось $O\eta$: $f_6 = K_6 F_\eta(t)$, а сигнал датчика Д9 - проекции вектора \vec{L} на неподвижную ось $O\zeta$: $f_9(t) = K_9 L_\zeta(t)$, где K_6 , K_9 - коэффициенты передачи измерительной системы по каналам датчиков Д6 и Д9 соответственно. При вращении изделия с постоянной угловой скоростью ω (см. рис.4.а) эти сигналы связаны с искомыми параметрами динамической неуравновешенности следующим образом:

$$\begin{aligned} f_6(t) &= K_6 F \cos(\omega t + \varphi_F) = K_6 \omega^2 (M_{yC} \cos \omega t - M_{zC} \sin \omega t), \\ f_9(t) &= K_9 L \sin(\omega t + \varphi_L) = K_9 \omega^2 (J_{xy} \cos \omega t - J_{zx} \sin \omega t), \end{aligned} \quad (1)$$

где φ_F , φ_L - углы между векторами \vec{F} и \vec{L} соответственно и вращающейся осью Oy .

Таким образом, при равномерном вращении изделия обработка измерительной информации заключается в выделении синфазных и квадратурных составляющих сигналов $f_6(t)$ и $f_9(t)$ на частоте вращения. Данная процедура в цифровой измерительной системе стенда реализуется на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ):

$$\begin{aligned} M_{yC} &= \frac{1}{K_6\omega^2} \frac{2}{nN} \sum_{i=1}^{nN} f_6(i\Delta t) \cos \frac{2\pi}{N} i\Delta t, \\ M_{zC} &= -\frac{1}{K_6\omega^2} \frac{2}{nN} \sum_{i=1}^{nN} f_6(i\Delta t) \sin \frac{2\pi}{N} i\Delta t, \\ J_{xy} &= \frac{1}{K_9\omega^2} \frac{2}{nN} \sum_{i=1}^{nN} f_9(i\Delta t) \cos \frac{2\pi}{N} i\Delta t, \\ J_{zx} &= -\frac{1}{K_9\omega^2} \frac{2}{nN} \sum_{i=1}^{nN} f_9(i\Delta t) \sin \frac{2\pi}{N} i\Delta t, \end{aligned} \quad (2)$$

где Δt – интервал дискретизации сигналов,

N – количество отсчетов сигналов, приходящееся на период колебаний (1 оборот изделия),

n – количество наблюдаемых периодов (оборотов).

Наиболее важными факторами, влияющими на точность определения параметров динамической неуравновешенности в рассматриваемом режиме, являются наличие помех, неравномерность вращения изделия, погрешности измерительных преобразователей. Основные составляющие помех связаны с собственными колебаниями механической системы по двум степеням свободы (поступательной и поворотной) на частотах, в 3-5 раз превышающих частоту вращения. Для подавления помеховых составляющих в схему преобразования сигналов введены фильтры Баттеруорта четвертого порядка, обеспечивающие требуемое (не менее 40 дБ) ослабление на частотах помех.

С целью исключения возмущающего действия привода вращения получение информации измерительной системой стенда производится при отведенном приводе в процессе свободного вращения изделия. В этих условиях, особенно при наличии у изделия или технологического приспособления, с помощью которого оно базируется на стенде, выступающих элементов, происходит затухание угловой скорости вращения. При требуемой точности определения МГХ (относительная погрешность менее 0.1%) даже малые затухания угловой скорости (порядка 0.1% за оборот) необходимо учитывать в алгоритме обработки информации.

При непостоянстве угловой скорости вращения ω (угловое ускорение $\varepsilon \neq 0$) векторы \vec{F} и \vec{L} развернуты относительно своих направлений при

$\omega = \text{const}$ на углы μ (см. рис. 4, 5). Измеряемые датчиками Д6 и Д9 сигналы, рассматриваемые как функции угла поворота $\theta = \int_0^t \omega(t) dt$, представляют собой колебания с переменными амплитудами и переменными фазовыми составляющими:

$$\begin{aligned} f_6(\theta) &= K_6 \omega^2(\theta) M \sqrt{y_C^2 + z_C^2} \sqrt{1 + tg^2 \mu(\theta)} \cos(\theta + \varphi_F - \mu(\theta)), \\ f_9(\theta) &= K_9 \omega^2(\theta) \sqrt{J_{xy}^2 + J_{xz}^2} \sqrt{1 + tg^2 \mu(\theta)} \sin(\theta + \varphi_L + \mu(\theta)). \end{aligned} \quad (3)$$

В настоящей работе предложена методика обработки сложных сигналов, описываемых выражениями (3) при произвольном законе изменения угловой скорости $\omega(\theta)$. Во многих случаях эта методика может быть существенно упрощена. Например, в условиях, которые реализуются на стенде для комплексного определения МГХ, при затухании угловой скорости не более 4% на интервале наблюдения с относительной погрешностью не более 0.01% можно положить:

$$\begin{aligned} f_6(\theta) &= K_6 M \sqrt{y_C^2 + z_C^2} \omega^2(\theta) \cos(\theta + \varphi_F - \mu_0), \\ f_9(\theta) &= K_9 \sqrt{J_{xy}^2 + J_{xz}^2} \omega^2(\theta) \sin(\theta + \varphi_L + \mu_0), \end{aligned} \quad (4)$$

где μ_0 - значение угла μ в начале измерения.

Тогда обработка измерительной информации для получения параметров динамической неуравновешенности заключается в выделении синфазных и квадратурных составляющих сигналов датчиков, нормированных по амплитуде функцией $\omega^2(\theta)$ с учетом фазовой поправки μ_0 . Покажем на примере сигнала f_6 :

$$\begin{aligned} a_F &= \frac{2}{2\pi n K_6} \int_0^{2\pi n} \frac{f_6(\theta)}{\omega^2(\theta)} \cos \theta d\theta, & b_F &= \frac{2}{2\pi n K_6} \int_0^{2\pi n} \frac{f_6(\theta)}{\omega^2(\theta)} \sin \theta d\theta, \\ M y_C &= \sqrt{a_F^2 + b_F^2} \cos(\mu_0 - \text{arctg} \frac{b_F}{a_F}), & M z_C &= \sqrt{a_F^2 + b_F^2} \sin(\mu_0 - \text{arctg} \frac{b_F}{a_F}). \end{aligned} \quad (5)$$

Для реализации данной процедуры в измерительной системе стенда на основе алгоритма ДПФ необходимо, чтобы отсчеты сигналов датчиков поступали через равные угловые интервалы. Для этого взятие отсчетов синхронизировано импульсами, вырабатываемыми через равные углы поворота изделия $\Delta\theta$ фотоэлектрическим датчиком с контрастной круговой шкалой. Кроме того, для обработки сигналов согласно выражениям (5) закон изменения угловой скорости $\omega(\theta)$ должен быть известен. Измерение интервалов времени Δt_i между импульсами фотоэлектрического датчика позволяет получить оценки мгновенных значений угловой скорости: $\tilde{\omega}(\theta_i) = \frac{\Delta\theta}{\Delta t_i}$. Данные

оценки. ввиду технологической неточности угловых расстояний между рисками круговой шкалы, имеют разброс значений. Их регуляризация осуществляется на основе экспериментально подтвержденной модели затухания угловой скорости, описываемой экспоненциальной функцией времени, или соответствующей линейной функцией угла поворота:

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-kt}, \quad \omega(\theta) = \omega_0 - k\theta. \quad (6)$$

Параметры модели ω_0 и k определяются экспериментально для каждого экземпляра изделия. Если интервал наблюдения соответствует $n = 2$ оборотам изделия, и на каждом обороте получено P оценок $\tilde{\omega}(\theta_i)$, то θ_i и θ_{i+P} различаются на 2π , и можно образовать P разностей $\tilde{\omega}(\theta_i) - \tilde{\omega}(\theta_{i+P})$. Параметр k определим, усредняя эти разности:

$$k = \frac{1}{2\pi P} \sum_{i=1}^P (\tilde{\omega}(\theta_i) - \tilde{\omega}(\theta_{i+P})) = \frac{1}{P^2} \sum_{i=1}^P \left(\frac{1}{\Delta t_i} - \frac{1}{\Delta t_{i+P}} \right). \quad (7)$$

Начальную частоту ω_0 вычислим, усредняя $2P$ частных оценок $\tilde{\omega}_0 = \tilde{\omega}(\theta_i) + ki\Delta\theta$:

$$\omega_0 = \frac{1}{2P} \sum_{i=1}^{2P} (\tilde{\omega}(\theta_i) + ki\Delta\theta) = \frac{\pi}{(P)^2} \left(\sum_{i=1}^{2P} \frac{1}{\Delta t_i} + k \sum_{i=1}^{2P} i \right). \quad (8)$$

Дополнительные сложности при обработке информации в условиях затухающего вращения обусловлены использованием фильтров для ослабления помех, связанных с собственными колебаниями механической системы стенда. Ввиду близости частот полезных и паразитных составляющих сигналов фильтры не только ослабляют помеховые составляющие, но и оказывают влияние на полезные, т.е. составляющие сигналов датчиков Д6 и Д9, связанные с вращением главного вектора и главного момента сил инерции. В условиях изменяющейся угловой скорости изделия, т.е. переменной частоты полезных составляющих сигналов, влияние фильтров тоже является переменным. Вблизи рабочей частоты на малом интервале ее изменения коэффициент передачи фильтра можно считать постоянными, а фазовый сдвиг аппроксимировать линейной зависимостью: $\psi(\omega) = \psi_0 - \sigma\omega$. При прохождении через фильтр с такой характеристикой происходит следующая трансформация полезной составляющей сигнала: задержка сигнала на время σ и постоянный фазовый сдвиг ψ_0 во всех частотных составляющих. В результате сигнал датчика Д6, пройдя через фильтр, имеет вид:

$$f_6^*(t) = K_6 M \sqrt{y_C^2 + z_C^2} \omega^2(t - \sigma) \cos(\theta(t - \sigma) + \varphi_F - \mu_0 + \psi_0). \quad (9)$$

Фазовый сдвиг ψ_0 учитывается в алгоритме обработки как дополнительная фазовая поправка. Задержка сигнала в фильтре приводит к изменениям функции нормировки амплитуды: $\omega^2(t - \sigma) = \omega^2(t)e^{2k\sigma}$, интервала дискретизации по углу поворота: $\Delta\theta^* = e^{k\sigma}\Delta\theta$, и количества отсчетов сигналов, приходящихся на один оборот изделия: $P^* = e^{-k\sigma}P$. С учетом сказанного, обработка сигналов на примере f_6 производится по следующим расчетным формулам:

$$\begin{aligned} a_{16}^* &= \frac{2}{[nP^*]} \sum_{i=1}^{[nP^*]} \frac{w(i)f_6^*(i\Delta\theta^*)}{e^{2k\sigma}(\omega_0 - ki\Delta\theta)^2} \cos(i\Delta\theta^*), \\ b_{16}^* &= \frac{2}{[nP^*]} \sum_{i=1}^{[nP^*]} \frac{w(i)f_6^*(i\Delta\theta^*)}{e^{2k\sigma}(\omega_0 - ki\Delta\theta)^2} \sin(i\Delta\theta^*), \\ M_{yC} &= \frac{1}{K_6} \sqrt{(a_{16}^*)^2 + (b_{16}^*)^2} \cos\left(\mu_0 - \psi_0 - \arctg \frac{b_{16}^*}{a_{16}^*}\right), \\ M_{zC} &= \frac{1}{K_6} \sqrt{(a_{16}^*)^2 + (b_{16}^*)^2} \sin\left(\mu_0 - \psi_0 - \arctg \frac{b_{16}^*}{a_{16}^*}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

где квадратные скобки обозначают округление до целого в большую сторону,

$w(i)$ - весовые коэффициенты отсчетов, $w(i) = 1$ для всех значений i , кроме $i = [nP^*]$, $w([nP^*]) = nP^* + 1 - [nP^*]$.

Алгоритм определения параметров динамической неуравновешенности в условиях затухания угловой скорости вращения состоит в следующем:

1) после достижения изделием заданного значения угловой скорости и отведения привода вращения производится дискретизация сигналов датчиков Д6 и Д9 синхронно с импульсами фотоэлектрического датчика Д12 (см. рис. 3.а) на целом числе (обычно $n = 2$) оборотов, одновременно измеряются интервалы времени Δt_i между импульсами датчика;

2) определяются параметры k и ω_0 модели затухания угловой скорости вращения согласно выражениям (7) и (8), а также величина фазовой поправки $\mu_0 = -\arctg(k/\omega_0)$;

3) при известных характеристиках ψ_0 и σ фильтров определяются величины $\Delta\theta^*$ и nP^* , массивы отсчетов сигналов усекаются до целой части nP^* , последнему отсчету присваивается весовой коэффициент $w([nP^*]) = nP^* + 1 - [nP^*]$;

4) на основе алгоритма ДПФ при вычисляемых коэффициентах $\cos(i\Delta\theta^*)$ и $\sin(i\Delta\theta^*)$ определяются параметры динамической неуравновешенности изделия M_{yC} , M_{zC} в соответствии с выражениями (10) для сигнала $f_6(t)$ и $J_{zz} J_{xy}$ в соответствии с аналогичными выражениями для сигнала $f_9(t)$.

Использование описанного метода обработки измерительной информации позволило определять параметры динамической неуравновешенности в

условиях затухания угловой скорости вращения практически с погрешностью силовизмерительных датчиков, т.е. 0.1% и ниже. Практическая ценность данного метода не ограничивается рассматриваемой специальной областью применения. Использование его в измерительных системах балансировочных станков позволило осуществлять динамическую балансировку широкого класса роторов (включая малогабаритные и имеющие выступающие элементы) без применения привода вращения.

3. ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МГХ ИЗДЕЛИЙ В РЕЖИМАХ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЙ

В третьей главе на основе решения дифференциального уравнения совмещенного маятника получены зависимости, позволяющие определять статический момент и осевой момент инерции изделия относительно оси качания на основе измерения периода колебаний и горизонтальной проекции динамического воздействия на ось качания. Предлагается методика определения продольной координаты центра масс, двух осевых и центробежного момента инерции изделия на основе измерения указанных параметров в трех положениях изделия в корпусе. Рассмотрена альтернативная методика определения МГХ на основе измерения периодов колебаний различных механических систем, потенциально более точная, но связанная с конструктивным усложнением стенда и большей трудоемкостью процесса измерения.

В рассматриваемом режиме измеряются суммарные характеристики изделия и корпуса, поэтому особое внимание должно быть уделено точности метода обработки информации.

Колебания изделия с корпусом на торсионе относительно оси Oz , совмещенной с осью газовых подшипников ГП (см.рис.3,в), под действием силы тяжести и силы упругости торсиона описываются дифференциальным уравнением:

$$J_{z,zz} \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -M_s g l_s \sin\varphi - c_{zz}\varphi, \quad (11)$$

где $J_{z,zz}$, M_s – осевой момент инерции и масса системы (изделие с корпусом),
 φ – угол поворота системы вокруг оси Oz ,
 l_s – расстояние от оси качания до центра масс системы,
 c_{zz} – угловая жесткость торсиона.

Решение данного уравнения, не выражающееся через элементарные функции, может быть получено только в виде приближенной аналитической зависимости (но с любой заданной точностью) или численно.

В процессе колебаний система воздействует на ось качания с силой, проекция которой на ось $O\eta$ измерительной системы выражается зависимо-стью:

$$F_{\eta}(\varphi) = \frac{M_s^2 g l_s^2}{J_{szz}} (2(\cos\varphi - \cos\varphi_0) + k(\varphi_0^2 - \varphi^2)) \sin\varphi + \frac{M_s^2 g l_s^2}{J_{szz}} (\sin\varphi + k\varphi) \cos\varphi, \quad (12)$$

где φ_0 - начальный угол отклонения системы, $k = c_{zz}/(M_s l_s g)$.

Зависимость $F_{\eta}(\varphi)$ близка к линейной, а колебания F_{η} во времени - гармоническим. Максимальное значение F_{η}^{max} , достигаемое при амплитудном значении угла отклонения φ_0 , равно:

$$F_{\eta}^{max} \approx \frac{M_s^2 g l_s^2}{J_{szz}} (\sin\varphi_0 + k\varphi_0) \cos\varphi_0. \quad (13)$$

На основе сопоставления приближенного решение дифференциального уравнения (11) и выражения (13) были получены расчетные зависимости, позволяющие определять статический момент и осевой момент инерции изделия относительно оси качания с относительной систематической погрешностью не выше 10^{-5} :

$$M_s l_s = \frac{T^2 F_{\eta}^{max}}{4\pi^2 \varphi_0 \cos\varphi_0}, \quad J_{szz} = \frac{T^2 c_{zz}}{4\pi^2} + \frac{T^4 F_{\eta}^{max} g \operatorname{tg}\varphi_0}{16\pi^4 \varphi_0^2}. \quad (14)$$

Исследования показали, что максимальное значение F_{η}^{max} горизонтальной проекции силы динамического воздействия на ось качания $F_{\eta}(t)$ выражается через амплитуду гармоники этих колебаний A_1 на частоте качаний соотношением: $F_{\eta}^{max} = 0.996 A_1$ с погрешностью не больше 10^{-4} в широком диапазоне возможных параметров изделий.

Итоговый алгоритм обработки информации в режиме совмещенного маятника состоит в следующем:

1) с помощью фотоэлектрического датчика Д12 измеряется период T колебаний изделия с корпусом и одновременно осуществляется дискретизация сигнала датчика Д6 через равные интервалы времени;

2) на основе алгоритма ДПФ определяется амплитуда A_1 первой гармонической составляющей колебаний $F_{\eta}(t)$ и определяется максимальное значение F_{η}^{max} этих колебаний;

3) при известной (измеренной ранее с помощью эталона) величине крутильной жесткости торсиона c_{zz} в соответствии с выражениями (14) вычисляются суммарные величины статического момента $M_s l_s$ и осевого момента инерции J_{szz} корпуса с изделием;

4) при известных характеристиках корпуса (J_{xzz} и $l_x = 0$) и известной (измеренной ранее в режиме динамической балансировки) величине статического момента изделия M_{yC} определяются осевой момент инерции J_{zz} и статический момент M_{xC} изделия:

$$J_{zz} = J_{szz} - J_{kzz}, \quad M_{xC} = \sqrt{(M_s l_s)^2 - (M_{yC})^2}. \quad (15)$$

Аналогичные измерения и вычисления производятся при повороте изделия в корпусе на 45° и 90° . При этом определяются осевые моменты инерции изделия соответственно относительно осей Oy и Ob - биссектрисы угла yOz . Затем на основании известного соотношения:

$$J_{yz} = \frac{1}{2}(J_{yy} + J_{zz}) - J_{bb} \quad (16)$$

определяется недостающий центробежный момент инерции изделия. Оценки величины статического момента M_{xC} , полученные в трех экспериментах, усредняются.

При использовании предложенного алгоритма погрешность определения статического момента изделия составляет менее 0.1% (определяется практически точностью силоизмерительного датчика), а погрешность определения двух осевых и центробежного момента инерции изделия - не выше 0.05%. Последнее обстоятельство объясняется тем, что у определяемых величин моментов инерции наибольший вес имеют составляющие, зависящие только от периода колебаний (см. выражения (14)), а период колебаний измеряется с высокой точностью (до 0.5 мкс).

Если экспериментально измеряемыми величинами будут только интервалы времени, это дает возможность еще более повысить точность определения искомого МГХ. Это справедливо для другого рассмотренного в работе метода определения МГХ, основанного на измерении периодов колебаний корпуса (T_k), корпуса с изделием ($T_{кн}$), корпуса с эталоном ($T_{кэ}$) и корпуса с изделием и эталоном ($T_{кнэ}$). Искомые МГХ изделия (статический момент и осевой момент инерции) выражаются через измеряемые величины и осевой момент инерции J_{szz} следующим образом:

$$J_{zz} = J_{szz} \left(\frac{T_{кн}^2}{T_{кнэ}^2 - T_{кн}^2} - \frac{T_k^2}{T_{кэ}^2 - T_k^2} \right),$$

$$Ml = \frac{4\pi^2}{g} J_{szz} \left(\frac{1}{T_{кнэ}^2 - T_{кн}^2} - \frac{1}{T_{кэ}^2 - T_k^2} \right) \quad (17)$$

и определяются практически с погрешностью осевого момента инерции эталона, т.е. 0.03%. Однако использование последнего метода связано с усложнением как экспериментального оборудования (конструирование специального

эталона с точно заданным осевым моментом инерции и нулевым статическим моментом относительно оси качания, обеспечение возможности его точного крепления на стенде), так и процедуры измерений, производимых для четырех вариантов колебательной системы. Он может быть рекомендован в тех случаях, когда такое усложнение оправдано повышенными требованиями к точности измерений.

4. КОРРЕКЦИЯ МАССОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ПРИСОЕДИНЕНИЕМ ДОБАВОЧНЫХ МАСС

В четвертой главе показаны особенности задачи коррекции МГХ изделий присоединением добавочных масс как многопараметрической оптимизационной задачи с неаналитически заданными ограничениями. Приводится обзор существующих методов решения задачи коррекции, указаны их недостатки. Предлагается поэтапный метод определения величин и координат оптимальной корректирующей системы.

После того, как основные МГХ были измерены, производится их пересчет в регламентируемые (масса, координаты центра масс, величины главных центральных моментов инерции и углы ориентации главных центральных осей инерции). В случае выхода регламентируемых МГХ за границы, определяемые допусками на эти величины, ставится задача их коррекции присоединением добавочных масс. Требуется определить величины и координаты корректирующих масс, обеспечивающих введение регламентируемых МГХ в допустимые интервалы, при заданных ограничениях на их размещение и минимальной суммарной добавочной массе.

Особенностью данной оптимизационной задачи, кроме большой размерности и нелинейности, является невозможность аналитического задания ограничений, связанных с ГЦМИ и углами ориентации ГЦОИ. Эти величины определяются с помощью следующей процедуры:

- при каждом наборе значений корректирующих масс и их координат вычисляются значения десяти основных МГХ;
- тензор инерции пересчитывается во вновь определенную центральную систему координат, оси которой параллельны осям системы *Отуз*;
- ГЦМИ определяются как собственные значения, а векторы-столбцы направляющих косинусов ГЦОИ - как собственные векторы центрального тензора инерции, причем решение задачи о собственных значениях и собственных векторах производится численным методом (в данной работе принят метод вращений с барьерами), так как прямой метод (решение характеристического уравнения) не обеспечивает вычислительной сходимости.

Другой особенностью рассматриваемой задачи является высокая цена ошибочного вывода о невозможности коррекции МГХ (разборка готового ЛА или его узла). Существующие методы поиска решения данной задачи либо обеспечивали коррекцию лишь части регламентируемых МГХ, либо основывались на методах или допущениях, не гарантировавших нахождения решения в случаях, когда оно существовало.

В данной работе предлагается решать поставленную задачу поэтапно.

1) Сначала производится предварительная проверка возможности коррекции МГХ, причем лишь по той части параметров, по которой такая проверка возможна в строгом виде без привлечения приближенных методов. Если в исходном состоянии у изделия масса или один из ГЦМИ превышает верхние предельные значения, или если минимальная масса, требуемая для введения в допустимую область центра масс, превышает верхнюю предельную величину суммарной корректирующей массы, то коррекция МГХ изделия присоединением добавочных масс невозможна, и оно подлежит разборке.

2) Если категорического заключения о невозможности коррекции МГХ сделано не было, определяются величины и координаты корректирующих масс, обеспечивающих полную симметрию распределения масс изделия относительно координатных плоскостей (т.е. совмещение центра масс и ГЦОИ с их номинальными положениями). При заданных ограничениях на размещение корректирующих масс (окружности известных радиусов в двух заданных плоскостях), определяемых конструктивными особенностями ЛА, минимальной суммарной массе соответствует система трех или четырех корректирующих масс. Если может быть найдена трехмассовая система, обеспечивающая полную симметрию распределения массы изделия, то она и соответствует минимуму суммарной массы. Если такой трехмассовой системы не существует, всегда может быть найдена четырехмассовая, причем не единственная. Минимальной суммарной массе в этом случае соответствует плоская система корректирующих масс, для которой хорды, попарно соединяющие массы в двух плоскостях коррекции, образуют с осью Oy углы 45° или 135° в зависимости от исходных характеристик распределения масс изделия.

Найденная на данном этапе корректирующая система, обеспечивающая номинальное положение центра масс и ГЦОИ, принимается за начальное приближение. Полная симметрия распределения масс в дальнейшем нарушается (при сохранении в допусках координат центра масс и углов ориентации ГЦОИ) для выполнения ограничения также и на другие МГХ (массу и ГЦМИ) и минимизации суммарной добавочной массы.

3) В настоящей работе показано, что изменение координат корректи-

рующих масс системы, принятой в качестве начального приближения, дает гораздо меньший эффект по исправлению нескорректированной части МГХ, чем изменение их величин. Данное обстоятельство позволяет первоначально зафиксировать координаты масс и рассматривать в качестве параметров оптимизации только их величины. При этом часть нелинейных ограничений становятся линейными и совместно с другими линейными ограничениями определяют в пространстве величин корректирующих масс m_i выпуклый многогранник возможных решений. Границы многогранника определяются симплекс-методом.

Задача данного этапа состоит в отыскании такой точки многогранника возможных решений, в которой удовлетворялись бы также и неаналитически заданные ограничения. Для этого определяются сечения многогранника плоскостью целевой функции ($Q = \sum m_i$) и в каждой точке сечения с заданным шагом вычисляются и сравниваются с допустимыми значениями ГЦМИ и углы ориентации ГЦОИ. Поиск осуществляется в автоматическом режиме в направлении от минимального к максимальному значению целевой функции, поэтому первая же найденная точка, в которой все ограничения оказались выполнены, соответствует минимальной суммарной массе.

Одновременно определяются и запоминаются наилучшие в смысле некоторого интегрального критерия (который задается как функция регламентируемых МГХ) варианты величин корректирующих масс. В случае, если решение будет пропущено вследствие первоначально заданной большой величины шага, эти наилучшие приближения позволяют сузить область дальнейшего поиска, производимого с меньшим шагом. Так как величины корректирующих масс существенно сильнее влияют на нескорректированные МГХ, чем их координаты, то решение (если оно существует) в большинстве случаев будет найдено на этапе автоматического поиска.

4) Если решение на предыдущем этапе найдено не было, или если решение найдено, но требуется его улучшить с целью еще некоторого уменьшения суммарной добавочной массы, выполняется этап полуавтоматического поиска. На основе анализа полученного решения или наилучших его приближений изменяются координаты корректирующих масс. Для нового положения масс вновь запускается процедура автоматического поиска вплоть до получения глобального минимума суммарной массы при выполнении всех заданных ограничений на МГХ.

Процедуры, описанные в данном разделе, реализованы в виде прикладной программы для персонального компьютера IBM в среде Windows, обеспечивающей удобный графический интерфейс и документирование каждого этапа работы.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан метод получения и обработки измерительной информации в режиме динамической балансировки, который включает:

- получение дискретной информации с датчиков в моменты, соответствующие равным углам поворота изделия, и измерение интервалов времени между этими моментами;
- построение модели затухания угловой скорости вращения и определение параметров модели для каждого исследуемого изделия;
- учет изменений частоты, амплитуд и фаз контролируемых сигналов, связанных с затуханием угловой скорости вращения;
- учет фазовых искажений сигналов при прохождении через фильтры, предназначенные для подавления помех на частотах собственных колебаний механической системы.

В результате полученная точность измерения параметров динамической неуравновешенности практически определяется погрешностями силоизмерительных датчиков и составляет менее 0.1%.

2. Разработан метод получения и обработки информации при определении статического момента и осевого момента инерции (МИ) изделия относительно оси качания в режиме совмещенного маятника на основе измерения периода колебаний и максимальной величины горизонтальной проекции силы динамического воздействия на ось качания. Данный метод обеспечивает определение осевого МИ и статического момента изделия с погрешностями 0.05% и 0.1% соответственно. Дополнительное конструктивное усложнение стенда дает возможность определять рассматриваемые параметры изделия на основе измерения только периодов колебаний и обеспечивает дальнейшее повышение точности измерений.

3. Предложенный в работе метод решения оптимизационной задачи большой размерности при неаналитическом задании части ограничений позволил определять величины и координаты корректирующих масс, обеспечивающих введение в допустимые интервалы всех регламентируемых МГХ изделий при минимальной суммарной добавочной массе. Использование начального приближения в виде корректирующей системы, соответствующей полной симметрии распределения массы изделия, позволило упростить на первом этапе решение задачи поиска путем фиксации координат корректирующих масс и облегчить поиск на заключительном этапе.

4. Результаты работы по измерению МГХ изделий реализованы в управляющей программе микропроцессорной измерительной системы стенда для комплексного контроля распределения масс изделий. Результаты работы по коррекции регламентируемых МГХ реализованы в виде приклад-

ных программ на компьютере IBM PC в среде Windows. Объединение микропроцессорной измерительной системы стенда и персонального компьютера позволило создать аппаратно-программный комплекс для контроля и коррекции распределения масс летательных аппаратов, обеспечивающий выполнение современных требований, предъявляемых к МГХ данного класса изделий.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Бондаренко Г.Д. Проблемы точности в измерительных системах балансировочных станков// Автоматизация расчета и контроля параметров изделий в машиностроении: Сб. научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – С.33-48.

2. Бондаренко Г.Д., Смирнов В.А., Федоров В.Б. Оценка параметров динамической неуравновешенности ротора в условиях затухания частоты вращения// Автоматизация расчета и контроля параметров изделий в машиностроении: Сб. научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – С.48-56.

3. Смирнов В.А., Бондаренко Г.Д., Федоров В.Б. Совершенствование измерительных систем балансировочных станков при балансировке на выбеге// Автоматизация расчета и контроля параметров изделий в машиностроении: Сб. научных трудов. Челябинск: ЧГТУ, 1994. – С.56-62.

4. Бондаренко Г.Д., Смирнов В.А. Повышение точности определения параметров неуравновешенности роторов при балансировке на выбеге// Тезисы докладов I Всероссийской научно-технической конференции "Балансировочная техника" М.: ВИМИ, 1994. С. 42-43.

5. Бондаренко Г.Д. Повышение точности определения параметров неуравновешенности роторов при балансировке на выбеге // Автоматизация и современные технологии 1995 №6. С.15-19.

6. Тиверской М.М., Бондаренко Г.Д. Алгоритмы автоматической обработки информации при контроле массогеометрических характеристик изделий// Автоматизация расчета и контроля параметров изделий в машиностроении: Сб. научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – С.3-15.

Издательство Челябинского
государственного технического университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 22.04.97. Формат
60x84 1/16. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1.
Тираж 100 экз. Заказ 138/183.

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.