

УДК 621.0481

Е. Н. Колганова¹, канд. техн. наук, **Е. П. Мельникова²**, д-р техн. наук, проф.,
В. А. Лебедев¹, канд. техн. наук, проф., **О. Н. Котенко¹**, аспирант.

¹Донской государственный технический университет (ДГТУ), Россия

²Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), ДНР, Россия

Тел./Факс: +7 (909) 430-95-99; E-mail: elenkolg@list.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ РАЗМЕРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

В статье рассмотрены причины возникновения размерной неустойчивости конструкций датчиков-преобразующей аппаратуры, а также физические механизмы ее проявления. Представлен расчетно-экспериментальный метод оценки размерной неустойчивости сборочных конструкций и отмечена актуальность его применения при создании датчиков-преобразующей аппаратуры.

Ключевые слова: метод, анализ, оценка, конструкция, датчиков-преобразующая аппаратура

Y. N. Kolganova, E. P. Melnikova, V.A. Lebedev, O.N. Kotenko

A COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL METHOD FOR ANALYZING AND EVALUATING THE DIMENSIONAL INSTABILITY OF ELECTROMECHANICAL SENSOR DESIGNS

The article considers the causes of the dimensional instability of the structures of data-converting equipment, as well as the physical mechanisms of its manifestation. An experimental method for estimating the dimensional instability of assembly structures is presented and the relevance of its application in the creation of sensor-converting equipment is noted.

Keywords: method, analysis, evaluation, design, sensor-converting equipment

1. Введение

Надежность современных технических объектов (ТО), во многом зависит от точности и стабильности размеров датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА), являющейся их неотъемлемой частью. Способность деталей высокоточных изделий к самопроизвольному изменению формы и размеров с течением времени является значительным препятствием на пути обеспечения непрерывно возрастающих требований к точности и надежности ДПА.

Эксплуатация ДПА осуществляется под воздействием различных дестабилизирующих факторов, среди которых можно выделить вибрацию, удары, акустический шум, линейные ускорения, температурное воздействие. Так в авиационных системах датчики должны обеспечивать их работоспособность при изменении температуры от -50 до +50°C, давления – от 1 до 0,01 атм, воздействии виброколебаний с амплитудой (0,25 - 2) мм в диапазоне частот от 20 до 200 Гц и перегрузках до 20 g. В ракетно-космических комплексах датчики подвержены вибрациям в диапазоне (30 -8000) Гц с амплитудой (0,5 - 40) мм, а также жесткому радиационному облучению и действию космических частиц. Действие всех вышеперечисленных внешних и внутренних факторов приводит к существенному изменению номинальных выходных характеристик ДПА, к возникновению погрешностей измерений и как следствие к потере работоспособности технического объекта.

2. Основное содержание и результаты работы

Воздействие вибрационных нагрузок широкого диапазона является наиболее частой причиной отказов и потери работоспособности ДПА. Накопление результата

воздействий вибрации на детали датчика происходит постепенно и незаметно, и выявляется с довольно большой скоростью на заключительных стадиях, сопровождаясь внезапным отказом, а также разрушающими и негативными последствиями. Во многих случаях вибрационное воздействие является определяющим фактором, позволяющим оценить безотказность работы датчика и прочность его конструкции.

В настоящее время вопрос взаимосвязи качества изделий с их эксплуатационными свойствами и, в частности, с обеспечением виброустойчивости конструкции, не получил должного разрешения. Поэтому задача учета этих факторов на стадии конструкторско-технологической проработки датчиков, эксплуатируемых в условиях повышенного воздействия вибраций, постоянной и переменной температуры является актуальной и имеет важное научное и практическое значение.

Обеспечение указанных требований является достаточно сложной задачей, решение которой связано с необходимостью использования методов анализа и оценки размерной нестабильности конструкций на стадии их конструкторско-технологической проработки.

В связи с этим, целью исследований является применение расчетно-экспериментального метода анализа и оценки размерной нестабильности конструкций электромеханических датчиков на стадии конструкторско-технологической проработки изделий с целью прогнозирования поведения деталей изделия в процессе эксплуатации.

Для достижения поставленной цели необходимо определить расчетные зависимости для оценки уровня нестабильности деталей и соединений, входящих в ДПА.

На значимое изменение величины параметра датчика, определяющего его функциональное назначение и точность, оказывают влияние различные внутренние и внешние факторы, обуславливающие появление значительных обратимых и необратимых изменений размеров его деталей. Вследствие чего, вариабельность выходных геометрических параметров размеров деталей (замыкающих звеньев) собранного узла зависит от комплекса различных факторов, которую в общем виде в векторной форме может быть описана уравнениями:

$$A_{\Delta} = \sum_i^n c_i A_i \quad \text{и} \quad T_{\Delta} = \sum_i^n |c_i| T_i \quad , \quad (1)$$

где A_{Δ}, T_{Δ} - номинальный размер и допуск исходного (замыкающего) звена датчика, определяющего его функциональное назначение; A_i, T_i - номинальный размер и допуск i -го звена размерной цепи; n - количество звеньев, образующих размерную цепь; c - передаточное отношения, определяющее влияние i -го звена размерной цепи на исходное (замыкающее) звено.

Установлено [1, 2, 3, 4, 7], что в процессе эксплуатации детали определяющие конструктивное исполнение датчика под действием различных внешних воздействий теряют свою точность, полученную при их изготовлении механической обработкой, оказывая таким образом существенное влияние на изменение величины замыкающего звена, достигнутой при сборке. Учитывая этот экспериментально подтвержденный факт выражение для определения допуска исходного (замыкающего) звена датчика, определяющего его функциональное назначение (1) наиболее правильно записать в виде:

$$\vec{T}_{\Delta} = \sum_i^n |c_i| (\vec{T}_{изг\ i} + \vec{T}_{эк\ i}) \quad , \quad (2)$$

где $\vec{T}_{изг\ i}$ - допуски составляющих звеньев размерной цепи, обеспечиваемые в процессе изготовления; $\vec{T}_{эк\ i}$ – дополнительные допуски, обусловленные характером внешнего воздействия на размеры, существенно влияющие на точность замыкающего звена.

Следствием внешнего воздействия на датчик в целом, так и его детали в процессе эксплуатации как показано в работе [3, 4, 6] являются: деформации составляющих звеньев размерной цепи датчика в сборе, обусловленные недостаточной жесткостью его деталей; деформации в размерной цепи, связанные с недостаточной жесткостью стыков сопрягаемых деталей; релаксация остаточных внутренних напряжений; микроползучесть под действием внешних нагрузок; изменения фазового и структурного состояния материала деталей.

Главной причиной протекания этих эффектов при эксплуатации, приводящих к изменению величины замыкающего звена и как следствие к потере его работоспособности является размерная нестабильность деталей, поступающих на сборку после механической обработки на этапе их изготовления и привнесённая на этапе сборки путем силового воздействия на них. Вероятностный характер проявления вышеотмеченных эффектов не позволяет в полной мере провести их расчетную оценку с использованием аналитических зависимостей и требует привлечения экспериментальных методов и исследований для их установления. В этой связи целесообразно дополнительные допуски, обусловленные характером внешнего воздействия на размеры, существенно влияющие на точность замыкающего звена выразить следующим образом

$$\vec{T}_{эк\ i} = k_{внеш. j} \vec{T}_{изг\ i}, \quad (3)$$

где $k_{внеш. j}$ - коэффициент, характеризующий зависимость допуска от характера внешнего воздействия на размер

С учетом (3) выражение для определения допуска исходного (замыкающего) звена датчика, определяющего его функциональное назначение (2) будет иметь вид

$$\vec{T}_{\Delta} = \sum_i^n |c_i| \vec{T}_{изг\ i} (1 + k_{внеш. j}). \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет с помощью коэффициентов c_i и $k_{внеш. j}$:

- проводить оценку влияния конкретного характера внешнего воздействия на точность замыкающего звена датчика;
- сравнивать относительную значимость различных эксплуатационных воздействий;
- обосновать какие поверхности нуждаются в большем внимании и более высоких требованиях по точности и параметрам качества поверхностного слоя для технологических звеньев;
- находить резервы повышения точности замыкающих звеньев и управлять ими через соответствующие параметры и характеристики конструкции или технологического процесса.

При расчетах степени изменения допусков составляющих звеньев датчика, с учетом характера внешнего воздействия предварительно необходимо оценить прочность деталей, формирующих конструктивное исполнение датчика, которая может приниматься или одинаковой, или разной. Для разно прочных звеньев размерной цепи датчика степень изменения допусков определяются как средняя величина.

Как было отмечено выше коэффициент $k_{\text{внеш.}j}$ устанавливающий зависимость допуска функционального звена датчика, достигнутого в процессе сборки выбранным методом достижения точности, от характера внешнего воздействия является следствием размерной нестабильности входящих в его состав деталей. Электромеханический датчик, как и любая сборочная единица представляет собой совокупность разъемных и неразъемных, подвижных и неподвижных соединений, находящихся после сборки в нагруженном и ненагруженном состоянии. Поэтому нестабильность его конструкции в целом λ будет складываться из нестабильностей деталей и их соединений.

3. Общий алгоритм и рекомендации

Выполненные исследования позволили разработать общий алгоритм, включающий в себя зависимости для оценки нестабильности деталей и соединений (таблица 1).

Таблица 1. Зависимости оценки нестабильности деталей и соединений [3, 6]

Состояние в сборочной единице	Расчетная зависимость	Примечание
Ненагруженные детали	$\lambda_{\text{д}} = \sum_{i=1}^m (\lambda_{\text{с}i} + \lambda_{\text{р}i}),$	$\lambda_{\text{с}i}$ — структурная нестабильность материала; $\lambda_{\text{р}i}$ — нестабильность, вызванная релаксацией остаточных напряжений возникающих в результате различных технологических воздействий; m — количество деталей в сборке ($i=1, m$).
Ненагруженные неразъемные соединения	$\lambda_{\text{нс}} = \sum_{j=1}^n (\lambda_{\text{с}j} + \lambda_{\text{р}j}),$	$\lambda_{\text{с}j}$ - структурная нестабильность материалов швов (сварных, паяных, клееных); $\lambda_{\text{р}j}$ - деформации, вызванной релаксацией остаточных напряжений; n — число неразъемных соединений ($j=1, n$).
Ненагруженные разъемные соединения	$\lambda_{\text{рс}} = \sum_{j=1}^{m-n-1} \lambda_j,$	$m-n-1$ — число разъемных соединений ($j=1, m-n-1$), λ_j — нестабильность, вызванная деформацией в контактных поверхностях соединения
Нагруженные детали от сборочного крепежа и посадок с натягом	$\lambda_{\text{нд}} = \sum_{i=1}^{m_{\text{р}}} \lambda_{\text{р}i} + \sum_{l=1}^{m_{\text{п}}} \lambda_{\text{п}l},$	$m_{\text{р}}$ — количество деталей, подвергнутых релаксации внутренних напряжений ($i=1, m_{\text{р}}$); $m_{\text{п}}$ — количество деталей, подвергнутых микроползучести под действием внешних напряжений ($l=1, m_{\text{п}}$); $\lambda_{\text{п}l}$ — нестабильность, вызванная микроползучестью детали.
Нагруженные швы	$\lambda_{\text{нш}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{р}}} \lambda_{\text{р}j} + \sum_{l=1}^{n_{\text{п}}} \lambda_{\text{п}l}$	$n_{\text{р}}$ — количество швов, подвергнутых релаксации ($j=1, n_{\text{р}}$); $n_{\text{п}}$ — количество швов, подвергнутых микроползучести ($l=1, n_{\text{п}}$).

Сущность расчетно-экспериментального метода заключается в поэтапном рассмотрении, на стадии конструкторско-технологической подготовки, стабильности материалов, соединений, отдельных деталей, узлов, и изделия в целом. Установление, представленных в таблице 1 нестабильностей деталей и их соединений, определяющих состав и функциональное назначение датчика может быть реализовано как расчетным

путём так и с применением экспериментальных методов исследований, При этом особого внимания требуют детали формирующие замыкающее звено функциональной размерной цепи датчика. Результатом расчетно-экспериментального метода является выработка мер и рекомендаций по обеспечению их наивысшей размерной стабильности в процессе эксплуатации за счет снижения величины коэффициента $k_{\text{внеш.}j}$, устанавливаемого из соотношения.

$$k_{\text{внеш.}j} = \sum_{j=1}^n \lambda_{\text{д}}, \lambda_{\text{нс}}, \lambda_{\text{рс}}, \lambda_{\text{нд}}, \lambda_{\text{нш}} \quad (5)$$

Главной целью применения метода является выявление факторов определяющих. снижение степени микроползучести деталей, характеризующейся медленным и непрерывным нарастанием пластической деформации при снижающихся во времени внутренних напряжениях в материале под воздействием внешних нагрузок. Чем больше сопротивление материала микропластическим деформациям во времени, тем выше его размерная стабильность в условиях эксплуатации и длительного хранения. Эта задача должна быть максимально решена на стадии изготовления деталей, определяющих конструктивное исполнения датчика путем применения технологических стабилизирующих операций.

4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. Установлено, что особого внимания требуют детали, формирующие замыкающее звено функциональной размерной цепи датчиков.

2. Предложены зависимости оценки нестабильности деталей и соединений.

Результаты проведенных исследований и предложенные для практического применения зависимости позволят улучшить конструкторско-технологического обеспечение изготовления деталей датчиков-преобразующей аппаратуры. Повышение размерной стабильности деталей на этапе их изготовления позволит снизить величину коэффициента внешнего воздействия и, как следствие, снизить степень их влияния на замыкающее звено датчика, обеспечивающего функциональное назначение.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Безъязычный, В. Ф., Обеспечение качества изделий при сборке / В. Ф. Безъязычный, В. В. Непомилуев, А. Н. Семенов. – М. : Издательский дом «Спектр», 2002. – 204 с.

2. Антонюк, В. Е. Динамическая стабилизация в производстве маложестких деталей / В. Е. Антонюк. - Минск: Беларуская навука, 2017. – 190 с.

3. Хенкин, М. Л. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении / М. Л. Хенкин, И. Х. Локшин. – М. : Машиностроение, 1974. – 256 с.

4. Гаврюсев, В. И. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций / В. И. Гаврюсев. – Л.: ЦНИИ «Румб», 1990. – 113 с.

5. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.

6. Яковлева, С. А. Размерная стабильность материалов и элементов конструкций в приборостроении / С. А. Яковлева, О. С. Юльметова // Изв. вузов. приборостроение. – 2010. – т. 53. – № 8. – С. – 23 – 26.

7. Ильицкий, В. Б. Модель обеспечения качества сборочных единиц на основе анализа размерных связей [Текст] / В. Б. Ильицкий, Е. А. Польский, Д. М. Филькин // СПРАВОНИК. Инженерный журнал. – М.: Машиностроение. – №4 (157). – 2010. – С. 51 – 56.

8. Тамаркин, М. А. Технология вибрационной стабилизирующей обработки изделий машиностроения / М. А. Тамаркин, С. Н. Шевцов, В. А. Лебедев, Ф. А. Пастухов // Научные технологии в машиностроении: журнал – Ростов-н/Д: ДГТУ, 2018 – С. 20 – 26.

Поступила в редколлегию 31.01.2024