

*На правах рукописи*



**Никонов Константин Петрович**

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА  
ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО  
АППАРАТА**

Специальность 05.13.12 – «Системы автоматизации проектирования»  
(в электронике, радиотехнике и связи)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Москва – 2015**

Работа выполнена на кафедре «Электронно-вычислительные средства и информатика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Орлов Валерий Павлович**  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Сахаров Юрий Серафимович**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Персональная  
электроника» Московского  
государственного университета  
приборостроения и информатики

**Чиграй Анатолий Григорьевич,**  
кандидат технических наук, доцент,  
начальник управления  
МОУ «Институт инженерной физики»

Ведущее предприятие: **ОАО «Научно - исследовательский институт  
точных приборов»**

Защита состоится 21 апреля 2015 г. в 13 часов 20 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.02 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете), расположенном по адресу: 125993, Москва А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета), и на сайте:

[http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=55445](http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=55445)

Автореферат разослан \_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.02,  
к.т.н, доцент



А.М.Петраков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**1. Актуальность проблемы.** В информационно – управляющих системах, используемых при испытаниях и эксплуатации изделий авиационной, ракетной и космической техники, энергетических установках ЛА доля параметра «давление» составляет существенную часть от общего числа измеряемых величин. Параметр «давление» используется для измерения скорости, высоты полета, расхода жидкости и газа и других параметров. Средством измерения этих параметров являются датчики давления. Жесткие требования к характеристикам датчиков по точности, быстродействию, надежности в условиях воздействия повышенных температур, вибраций и других неблагоприятных внешних факторов позволяют выделить класс датчиков со своими особенностями и требованиями к системе автоматизированного проектирования.

Традиционный маршрут проектирования с использованием САПР включает решение задач структурного и параметрического синтеза с последующим анализом полученных проектных решений отдельно для электронных схем, программного обеспечения, несущих конструкций. Современные САПР предлагают ограниченные возможности для решения задачи структурного синтеза. Возможный подход к решению задачи структурного синтеза может быть следующим. Датчик рассматривается как сложная система с учетом связей и взаимодействий входящих в состав подсистем. Тогда, построив системную модель датчика и соответствующие структурно – параметрические модели подсистем, возможно установить связи и определить параметры подсистем датчика с учетом заданных ограничений и параметров внешней среды. Использование описанного подхода тесно связано с выбором маршрута проектирования. На этапе выбора САПР учитываются потенциальные возможности, особенности и эффективность использования САПР на различных этапах проектирования, возможность поддержки типовых решений и стандартных библиотек; распространенность и возможность стыковки с другими САПР и др. Для решения перечисленных задач возникает необходимость использования нескольких САПР для создания единого маршрута проектирования.

Таким образом, задача проектирования выделенного класса датчиков предполагает следующую особенность процедуры проектирования – совместное проектирование первичного преобразователя, аналогового и цифрового фрагмента прибора, несущих конструкций в условиях воздействия повышенных температур, вибраций и других неблагоприятных внешних

факторов при заданных требованиях по точности, быстродействию, надежности.

В соответствии с системным подходом, проектирование датчика давления разбивается на уровни, где элемент может быть описан с использованием системной и набора структурно – параметрических моделей, учитывающих внешние связи. В рамках данного подхода необходимо разработать модели и алгоритмы для синтеза и анализа статических и динамических характеристик датчика давления, первичного преобразователя, моделей для проведения поверочных конструкторских расчетов, проектирования несущих конструкций и как результат - методику проектирования для выделенного класса датчиков давления. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной, а поставленные задачи исследования обладают практической значимостью.

**2. Целью работы** является повышение эффективности проектирования класса датчиков давления путем использования современных методов моделирования, разработки моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений, а также интеграции САПР инженерного анализа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ текущего состояния САПР, обеспечивающих разработку и исследование моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений для выбранного класса датчиков давления;

2. Разработать системные и структурно – параметрические модели функциональных элементов датчиков давления и алгоритмы, позволяющие автоматизировать на стадии проектирования задачи синтеза и анализа их статических и динамических характеристик;

3. Разработать и исследовать в САПР инженерного анализа модели несущих конструкций, электронных модулей и первичного преобразователя для выбранного класса датчиков давления, обеспечивающих синтез и анализ проектных решений;

4. Разработать методику проектирования для выбранного класса датчиков давления;

5. Выполнить исследование точности и адекватности разработанной методики, а так же моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений, используя натурные испытания макетного образца датчика давления.

**3. Методы исследования.** Объектом исследования является система автоматизированного проектирования класса датчиков давления, используемых

при испытаниях и эксплуатации изделий авиационной, ракетной и космической техники.

Предметом исследования являются модели и алгоритмы синтеза и анализа проектных решений датчика давления, позволяющие реализовать требуемые характеристики с учетом заданных ограничений.

Для решения вышеуказанных задач в работе применялись методы математического моделирования, теории измерений, автоматического управления, теории теплообмена, планирования эксперимента, статистической обработки результатов эксперимента.

**4. Научная новизна** диссертации заключается в обосновании системного подхода к задачам проектирования и оценке эффективности проектных решений для выделенного класса датчиков давления. В процессе исследования сформированы следующие положения и выводы, обладающие научной новизной:

1) Методика проектирования выделенного класса датчиков давления на основе разработанных моделей для синтеза и анализа проектных решений, отличающаяся тем, что учитывает возможность интеграции САПР и совместное моделирование.

2) Методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей давления, не соответствующих требуемым характеристикам в диапазоне заданных температур, выполненная на основе разработанных структурно – параметрических моделей, предназначенных для проектирования статических и динамических характеристик, и проведенного эксперимента.

3) Системные и структурно - параметрические модели дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления и модуля преобразования электрических сигналов, позволяющие рассчитывать статические и динамические характеристики датчика давления, проводить расчет параметров этих элементов и датчика давления с учетом внешних воздействующих факторов.

## **5. Практическая ценность.**

1. Предложенная методика проектирования для выделенного класса датчиков давления позволяет сократить время проектирования и, как следствие, стоимость конечного продукта.

2. Методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей давления позволяет обеспечить линейность статической характеристики датчика и повысить качество проектных работ.

3. Предложенные модели для датчика давления, разработанные в средах MATLAB, MathCAD, позволяют выполнить оптимизацию параметров датчика для различных случаев функции плотности распределения вероятности погрешности при ограничении на заданную точность, длительность переходного процесса и ширину полосы пропускания частот.

4. Разработанные в САПР Solid Works трехмерные модели, позволяют сократить трудоемкость и длительность разработки выделенного класса датчиков давления.

5. Предложенная полезная модель, позволяет выполнить оптимизацию параметров дифференциально – емкостного первичного преобразователя давления, модуля преобразования электрических сигналов и микроконтроллера для различных случаев функции плотности распределения вероятностей погрешности при ограничении на заданную точность, длительность переходного процесса и ширины полосы пропускания частот.

#### **6. Достоверность и обоснованность.**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается использованием известного инструментария и совпадением результатов моделирования с использованием предложенных моделей с результатами экспериментального исследования макета датчика давления. Результаты моделирования отличаются от результата эксперимента на 6,5%.

#### **7. Положения, выносимые на защиту:**

1. Предложенная методика проектирования позволяет эффективно решать задачи синтеза и анализа проектных решений с учетом заданных ограничений для выделенного класса датчиков давления;

2. Разработанные системные, структурно – параметрические и расчётные модели позволяют автоматизировать синтез и анализ статических и динамических характеристик для рассматриваемого класса датчиков давления при ограничении на заданную точность, длительность переходного процесса и ширины полосы пропускания частот;

3. Предложенные расчетные модели класса датчиков давления для САПР инженерного анализа в рамках существующих ограничений позволяют выполнить совместный параметрический синтез несущих конструкций, электронных модулей и первичного преобразователя.

**8. Внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы внедрены в ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, о чем имеется соответствующий

акт о внедрении, а также использованы при подготовке инженеров по специальности 210202 кафедрой «Электронно-вычислительные средства и информатики» Московского авиационного института в рамках дисциплины «Имитационное моделирование в среде MATLAB».

**9. Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на 2 международных и 3 российских научно-технических конференциях. Основное содержание диссертации изложено в 10 научных работах в научно-технических журналах и трудах конференций, из которых 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней, получен патент на полезную модель.

**10. Результаты диссертации опубликованы** в 10 печатных работах [1-9], включая статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ [1-4]. По результатам исследований получен патент на полезную модель [10].

### **11. Структура и объем диссертационной работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, библиографического списка (72 работы отечественных и зарубежных авторов) и приложений. Общий объем диссертации – 149 страниц, включая 24 таблицы и 114 рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных лично автором результатов. Указаны положения, выносимые на защиту, сведения об апробации и основных публикациях. Приведены сведения о структуре и объеме диссертации, дана общая характеристика работы.

**В первой главе** выполнен анализ и особенности системного подхода к проектированию датчиков давления. Датчик давления рассматривается с позиции сложной системы, состоящей из различных подсистем с учетом их связей и взаимодействий. Системный подход к проектированию подразумевает, что необходимо выполнить синтез структуры, установить связи и определить параметры с учетом заданных ограничений. Решаемые проектные задачи разбивают на уровни, которые отличаются степенью детализации. Такое разбиение полностью соответствует системному подходу к проектированию. На рисунке 1 представлен датчик давления в соответствии с иерархическими

уровнями. На каждом следующем уровне подсистемы, с соответствующими связями рассматриваются отдельно. Увеличивая степень детализации, изменяется перечень задач синтеза и анализа проектных решений. Для выбора альтернатив используются соответствующие показатели предпочтения. Таким образом, для синтеза и анализа подсистем датчика давления требуется совместное функционирование САПР различного назначения (CAE,CAD,CAM), а также управления данными проекта.

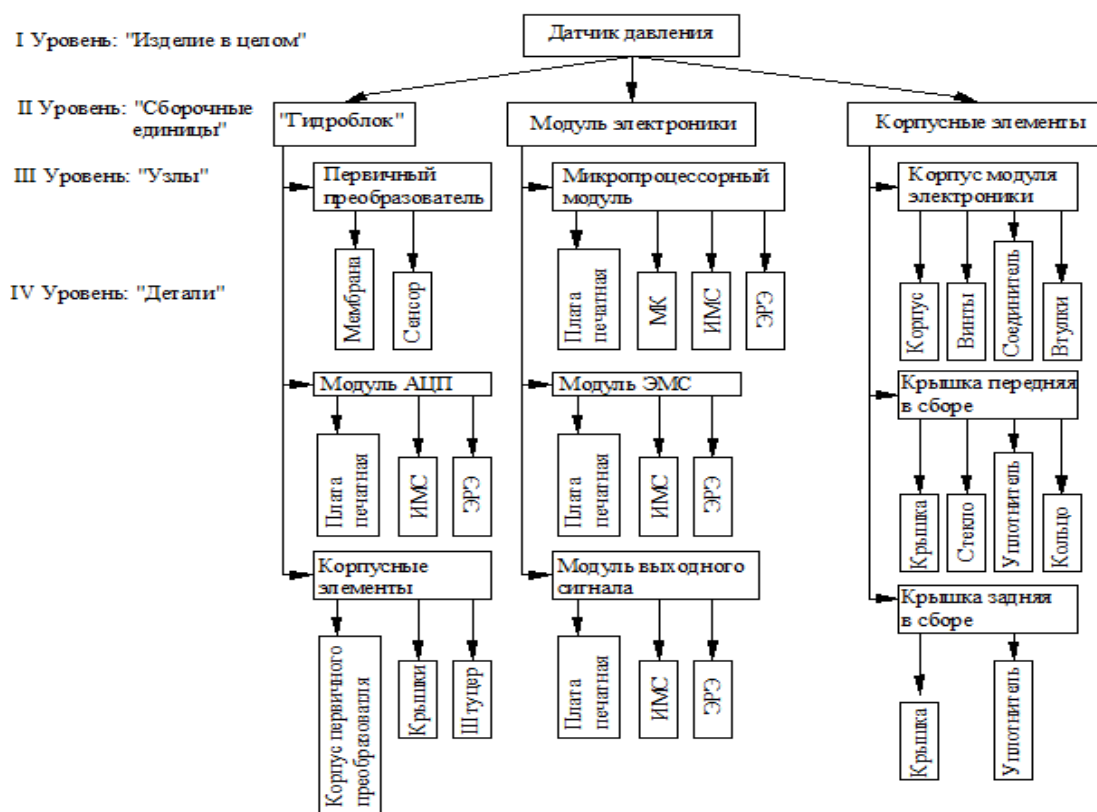


Рисунок 1 – Обобщенная структура датчика давления

Анализ современных САПР показывает, что большинство из них предполагает параметрическую оптимизацию при заданной структуре проектируемого устройства. При этом не решаются задачи синтеза структуры. Таким образом, возникает проблема структурно-параметрического синтеза сложной системы, оптимизации структуры и параметров подсистем.

Для решения задачи структурно-параметрического синтеза в соответствии с системным подходом необходимо разработать обобщенную модель датчика давления. Модель представляет собой агрегативную систему, которая разбивается на конечное число подсистем, сохраняя при этом связи, обеспечивающие их взаимодействие. В результате сложная система представляется в виде иерархической структуры из объединенных подсистем различных уровней (рисунок 1). При этом подсистемы являются частными макромоделями для выбора проектного решения. Процедуры синтеза и анализа



выполняются с разработанной макромоделью. Маршрут синтеза и анализа проектного решения представлен на рисунке 2.

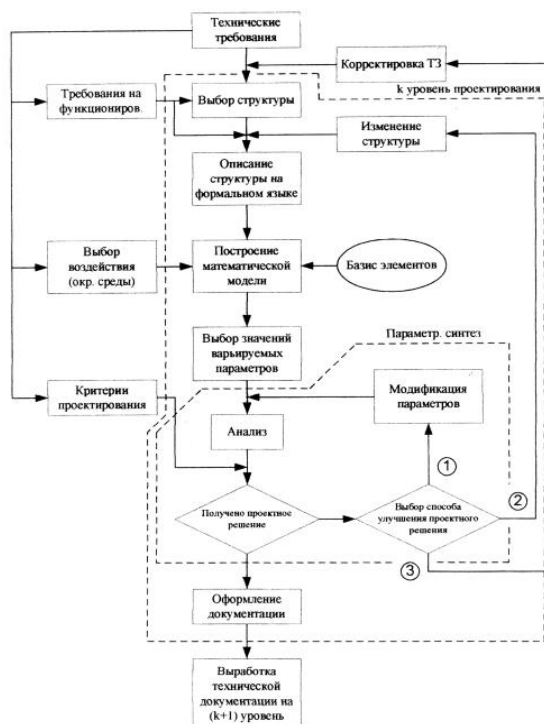


Рисунок 2 – Модифицированный маршрут синтеза и анализа проектного решения с использованием макромодели

Данный маршрут соответствует выбору проектного решения, как функциональных модулей датчика, так и его конструкции. Полученные по результатам моделирования характеристики и параметры являются исходными данными для следующего уровня проектирования.

Также в данной главе для выделенного класса датчиков обоснованы основные требования: диапазон измеряемого давления от -100 кПа до 100 МПа, нелинейность статической характеристики не более 5%, погрешность измерения до  $\pm 0,05\%$  от ВПИ, температурная погрешность до  $\pm 0,1\%$  от ВПИ, длительность переходного процесса не более 0,1 с. К конструкции датчиков предъявляют повышенные требования на стойкость к внешним механическим факторам: к воздействию вибраций до 2000 Гц с ускорением 16g, к воздействию ударов с ускорением до 160 g, диапазон рабочих температур от -60°C до +85°C,

Для обеспечения указанных требований был выполнен анализ первичных преобразователей давления, показаны достоинства и недостатки датчиков давления с различными преобразователями, даны их технические характеристики. Обосновано, что одним из наиболее перспективных первичных

преобразователей для выделенного класса является дифференциально-емкостной, представленный на рисунке 3.

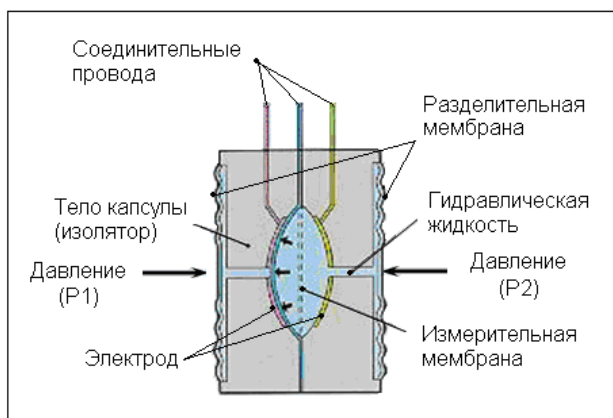


Рисунок 3 – Дифференциально - емкостной первичный преобразователь

Статические характеристики дифференциально-емкостного первичного преобразователя и схемы преобразования электрических сигналов в цифровой код обычно нелинейные, как результат - общая статическая характеристика датчика давления  $y_d = f(\Delta P)$  нелинейная. При выборе структуры и физических параметров указанных элементов, с учетом заданных ограничений, требуемая статическая характеристика достигается только с использованием корректирующего звена, что влияет на качество динамических характеристик датчика давления. Дополнительно к конструкции датчика предъявляются жесткие требования на стойкость к внешним воздействующим факторам, при этом также имеется ряд конструктивных ограничений. Соответственно необходимо выполнить синтез и анализ конструкции датчика давления.

В этой связи требуется решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику проектирования для выбранного класса датчиков давления.

2. Разработать системные, структурно – параметрические и расчетные модели дифференциально - емкостного первичного преобразователя давления и модуля преобразования электрических сигналов в цифровой код, позволяющие автоматизировано рассчитывать статические и динамические характеристики датчика давления с учетом внешних воздействующих факторов.

3. Разработать и исследовать в САПР инженерного анализа модели несущих конструкций, электронных модулей и первичного преобразователя для выбранного класса датчиков давления, обеспечивающих синтез и анализ проектных решений.

4. Выполнить исследование точности и адекватности разработанной методики, а так же моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений, используя натурные испытания макетного образца датчика давления.

**Во второй главе** разработаны структурно - параметрические модели для автоматизации синтеза и анализа параметров статических и динамических характеристик для выделенного класса датчиков давления.

Типовая структурная схема модели для статического режима измерения выделенного класса датчиков давления представлена на рисунке 4. В её состав входит последовательно соединенные звенья первичного преобразователя, модуля преобразования электрических сигналов в цифровой код и микроконтроллера.

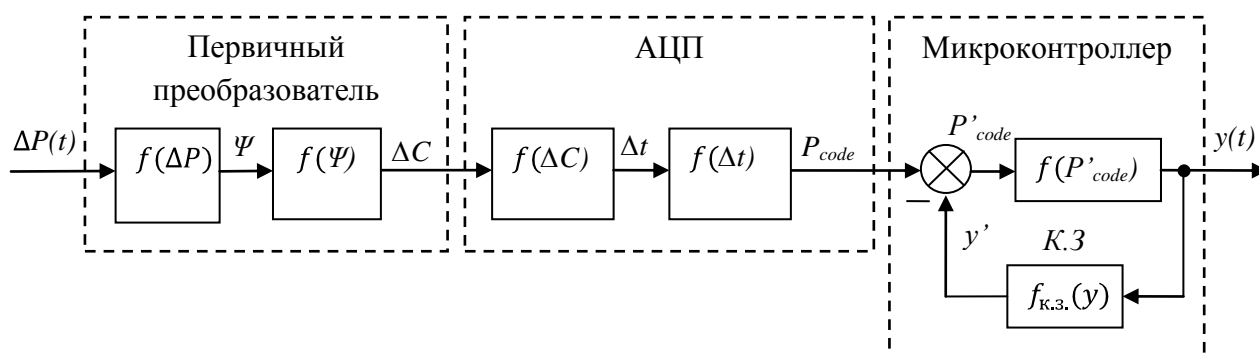


Рисунок 4 – Структурная схема модели класса датчиков давления для статического режима измерения

Функции преобразования анализируемых звеньев представлены в таблице 1. Здесь приняты следующие обозначения:  $\Delta P$  - измеряемое давление,  $\Psi$  - перемещение мембраны,  $R$  – радиус мембраны,  $h$  – толщина мембраны,  $E$  – модуль упругости материала мембраны,  $\Delta C$  - разность емкостей между электродами,  $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $\epsilon_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость,  $D_0$  - расстояние между электродами (обкладки конденсатора),  $a$  – ширина обкладок,  $\Delta t$  - разность времён заряда и разряда емкостей,  $U_{разр}$  – напряжение, до которого разряжается емкость,  $U_{зар}$  – напряжение, до которого заряжается емкость,  $U_{пит}$  – напряжение питания схемы,  $R_{зар}$  – резистор, через который заряжается емкость,  $R_{разр}$  – резистор, через который разряжается емкость,  $P_{code}$  - выходной код АЦП,  $y$  - выходной сигнал датчика давления,  $f_{к.з.}(y)$  - статическая характеристика корректирующего звена. Получена расчетная статическая характеристика схемы измерения

$$f_{P_{с.и.}}(\Delta P; q_1, q_2, \dots, q_5) = q_5 \cdot q_4 \cdot q_3 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}) = q_6 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}) \quad (1)$$

и общая расчетная статическая характеристика датчика давления (СХДД)

$$y = f((q_6 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}) - f_{к.з.}(y))). \quad (2)$$

Таблица 1. Зависимости преобразования измеряемого давления звеньев и их коэффициенты.

Зависимости	Коэффициенты
$\Psi = f(\Delta P) = q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}$	$q_1 = 0,2793 \cdot \frac{R^4}{E \cdot h}, q_2 = 0,1706 \cdot \frac{R^4}{E \cdot h^3}$
$\Delta C = f(\Psi) = q_3 \cdot \Psi$	$q_3 = \frac{\varepsilon_0 \cdot a}{D_0} \cdot (\varepsilon_r - 1)$
$\Delta t = f(\Delta C) = q_4 \cdot \Delta C$	$q_4 = 8 \cdot (R_{зап} \cdot (\ln(1 - \frac{U_{разр}}{U_{num}}) - \ln(1 - \frac{U_{зап}}{U_{num}})) - R_{разр} \cdot \ln(\frac{U_{разр}}{U_{зап}}))$
$P_{code} = f(\Delta t) = q_5 \cdot \Delta t$	$q_5 = const$
$f_{p.c.u.}(\Delta P; q_1, q_2, \dots, q_5) = q_6 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}),$	$q_6 = q_5 \cdot q_4 \cdot q_3$
$y = f(P_{code} - f_{к.з.}(y))$	---

При выборе параметров расчетной статической характеристики датчика давления необходимо решить задачи синтеза - определить параметры  $q_1, q_2, \dots, q_n$  при которых её отклонение от желаемой статической характеристики  $f_{жс}(x)$  на интервале  $x_n \leq x \leq x_6$  не превышает заданного значения. Задача анализа - определить расчетную статическую характеристику  $y(x; q_1, q_2, \dots, q_n)$ , имеющего известные структурную схему и параметры, оценить её отклонение от  $f_{жс}(x)$  при учёте погрешностей параметров  $q_1, q_2, \dots, q_n$  и внешних воздействующих факторов.

Традиционно эти задачи решаются с помощью методов интерполяции, наименьших модулей и наименьших квадратов. Модели для реализации разрабатывались в MathCAD. В алгоритме для первой модели используется метод интерполяции. На рисунке 5 представлена расчетная СХДД. Особенностью является то, что она совпадает с желаемой СХДД  $y = f_{жс}(x)$  в точках  $N_1, N_2, \dots, N_n$ , которые являются узлами интерполяции.

Погрешность приближения, выраженная формулой

$$\Delta_{II}(x; q_1, \dots, q_n) = f_p(x; q_1, \dots, q_n) - f_{жс}(x), \quad (3)$$

равна нулю в точках  $M_1, M_2, \dots, M_n$ .

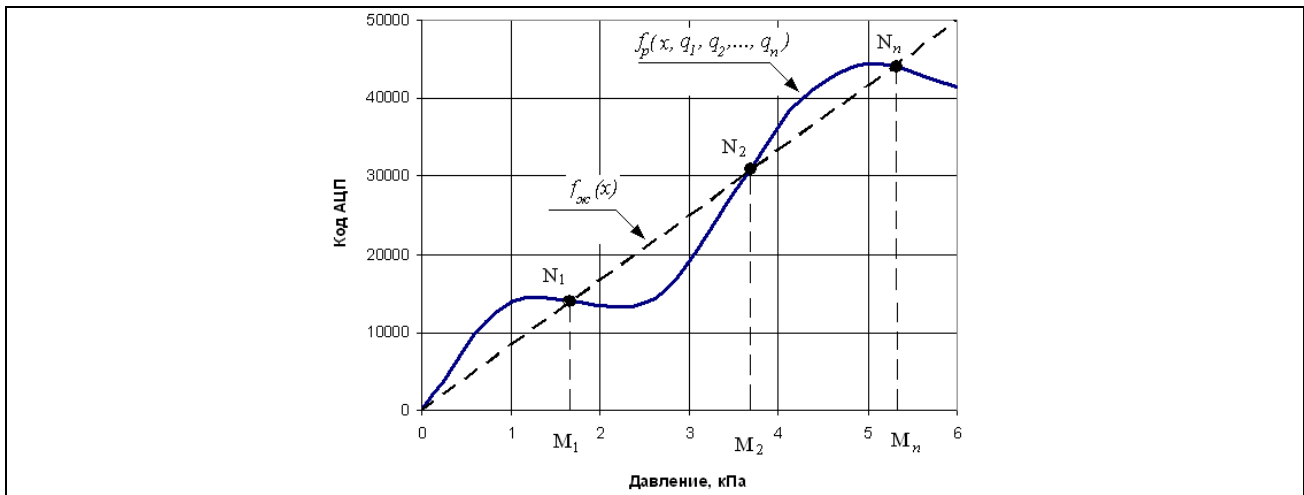


Рисунок 5 – Выбор точек  $N_1, N_2, \dots, N_n$  при решении задачи синтеза методом интерполяции

Параметры  $q_1, q_2, \dots, q_n$  рассчитываются, решая систему  $n$  алгебраических уравнений

$$f_p(M_i; q_1, \dots, q_n) = f_{жс}(M_i) \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $M_i$  - абсциссы узлов интерполяции, размещенные внутри диапазона измерений. Число узлов интерполяции  $n$  и их координаты  $M_i$  выбирают так, чтобы максимальное значение модуля погрешности приближения  $\Delta_{Пmax}$  не превышало заданного на проектирование значения, или выполнялось требование к распределению этой погрешности по диапазону измерений.

Максимальная приведенная погрешность приближения рассчитывается по формуле

$$\gamma_{П} = \frac{\Delta_{Пmax}}{|y_{ав} - y_{ан}|} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где  $y_{ав}$  и  $y_{ан}$  - граничные ординаты желаемой статической характеристики датчика давления  $f_{жс}(x)$ .

В модели, в которой используется метод наименьших модулей, параметры  $q_1, q_2, \dots, q_n$  расчетной СХДД подчинены критерию минимакса

$$\Delta_{Пmax} = \max_{P_H \leq P \leq P_B} |f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n) - f_{жс}(x)| = \min, \quad (6)$$

где  $P_H$  и  $P_B$  - соответственно нижний и верхний пределы измерения. При этом график расчетной статической характеристики должен находиться между двумя параллельными кривыми, которые удалены от графика желаемой характеристики на одинаковую величину  $\Delta_{Пmax}$ . Особенностью данной модели является то, что все экстремумы погрешности приближения равны друг другу по модулю и чередуются по знаку. На рисунке 6 представлена расчетная

статическая характеристика  $y = f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n)$ , которая является кривой наименьших модулей (КНМ).

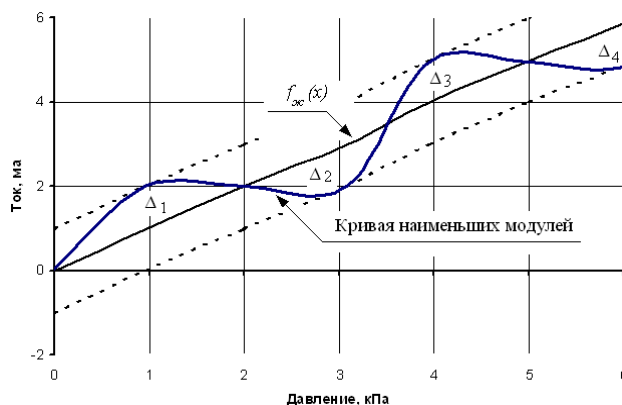


Рисунок 6 – График кривой наименьших модулей

Синтез параметров  $q_1, q_2, \dots, q_n$  методом наименьших модулей используют для случая, когда во всем диапазоне измерений отклонение расчетной статической характеристики от желаемой не должно превышать заданной величины  $\Delta_{Пmax}$ .

Модель для метода наименьших квадратов обеспечивает поиск параметров  $q_1, q_2, \dots, q_n$  расчетной СХДД в соответствии с критерием минимума математического ожидания квадрата погрешности приближения

$$D_{\Pi}(q_1, q_2, \dots, q_n) = \int_{P_H}^{P_B} p_p(P) [f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n) - f_{Ж}(P)]^2 dx = \min, \quad (8)$$

где  $p_p(P)$  - плотность распределения вероятности погрешности (ПРВ), представленная на рисунке 7.а. Полученная СХДД  $y = f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n)$  с рассчитанными коэффициентами  $q_1, q_2, \dots, q_n$  будет являться кривой наименьших квадратов (КНК). Значения погрешности приближения, показанной на рисунке 7.б малы там, где значения ПРВ  $p_p(P)$  максимальны.

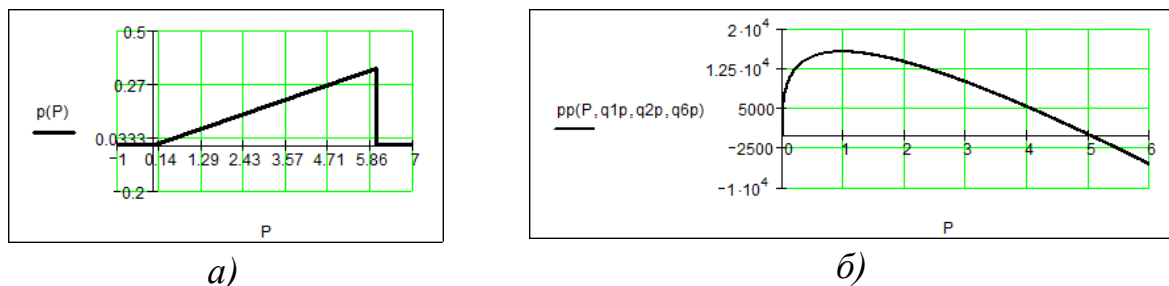


Рисунок 7 – График функции плотности распределения вероятностей (а), график погрешности приближения (б)

Оценка проведена по величине среднеквадратической приведенной погрешности приближения (СППП)

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\sqrt{D_{\Pi \min}}}{|y_{ав} - y_{ан}|} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $D_{\Pi \min}$  - минимальное значение функции (8).

Используя перечисленные модели, были получены параметры расчетной статической характеристики схемы измерения датчика (1) для различных исходных данных.

Структурная схема модели для динамического режима измерения выделенного класса датчиков давления представлена на рисунке 8.

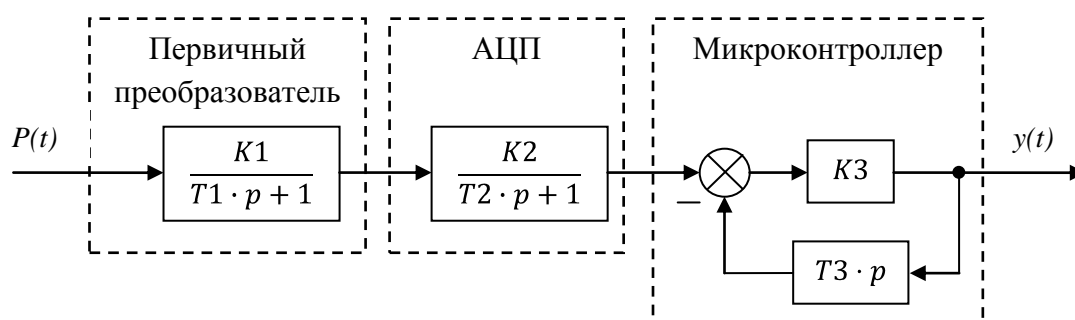


Рисунок 8 – Структурная схема модели класса датчиков давления для динамического режима измерения

Рассчитана передаточная функция для класса датчиков давления

$$W_{\partial\partial}(p) = \frac{K}{T^3 \cdot p^3 + a1 \cdot T^2 \cdot p^2 + a2 \cdot T \cdot p + 1} \quad (11)$$

$$\text{или } W_{\partial\partial}(p) = \frac{K \cdot \omega_0^3}{p^3 + a1 \cdot \omega_0 \cdot s^2 + a2 \cdot \omega_0^2 \cdot s + \omega_0^3} \quad (12)$$

где  $T$  - постоянная времени датчика давления [с],  $\omega_0$  - собственная частота датчика давления [рад/с],  $a1$ ,  $a2$  - безразмерные параметры Вышнеградского. На динамические характеристики датчика давления влияют три параметра -  $\omega_0$ ,  $a1$  и  $a2$ , которые зависят только от параметров датчика давления. Значения  $a1$  и  $a2$  вычисляются по формулам:

$$a1 = \frac{1+2 \cdot \xi \cdot Q}{\sqrt[3]{Q^2}}, \quad a2 = \frac{Q+2 \cdot \xi}{\sqrt[3]{Q}}, \quad (13)$$

где  $Q$  - относительная постоянная времени,  $\xi$  - безразмерный относительный коэффициент демпфирования.

При выборе параметров передаточной функции датчика необходимо определить такие значения параметров  $\omega_0$ ,  $a1$  и  $a2$  передаточной функции  $W(p)$ , при которых датчик имеет желаемые динамические характеристики. При

постановке задачи оптимизации параметров  $\omega_0$ ,  $a1$  и  $a2$  используются критерии минимальной длительности переходного процесса (ДПП)  $t_n$  при ограничении относительной переходной погрешности  $\Delta$ , максимальной ширины полосы пропускания частот (ППЧ)  $\omega_n$  при ограничении относительной частотной погрешности  $\varepsilon$  и др. Задача анализа - определить динамические характеристики датчика от параметров  $\omega_0$ ,  $a1$  и  $a2$  его передаточной характеристики  $W(p)$ .

Алгоритмы для автоматизированного расчета оптимальных значений параметров передаточной функции представлены на рисунке 9.

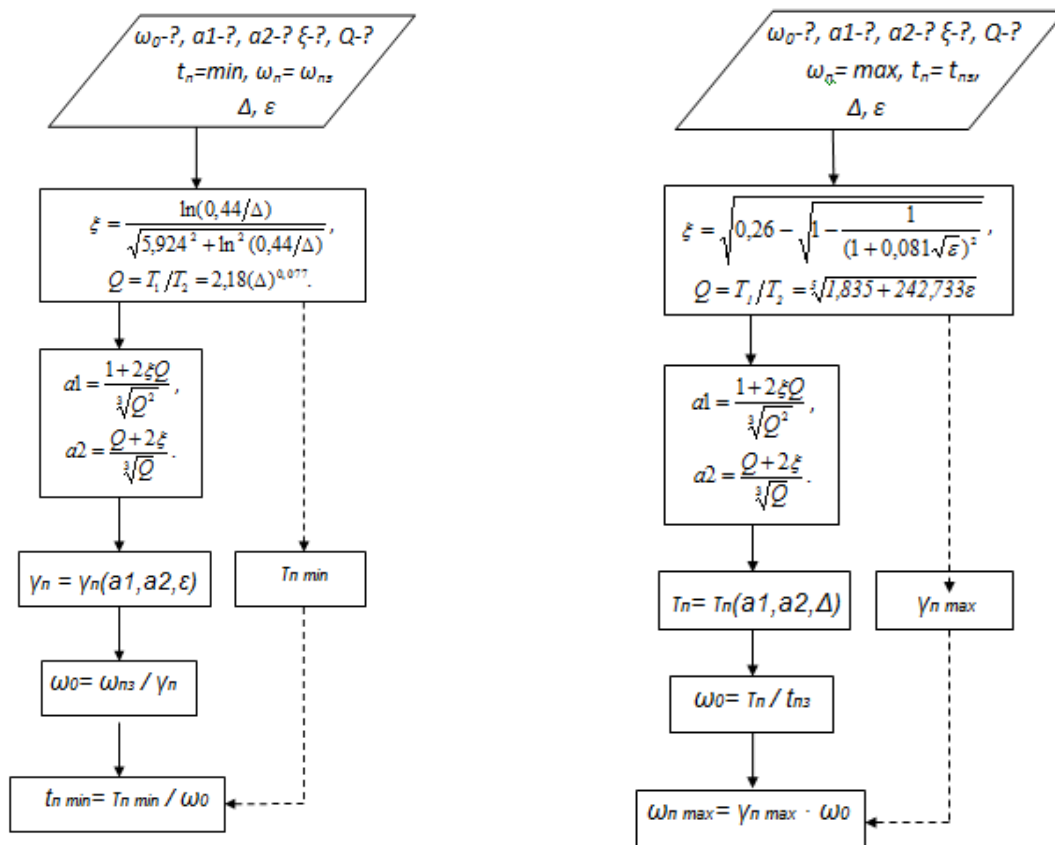


Рисунок 9 – Схемы алгоритмов расчета параметров передаточной функции

Используются следующие обозначения:  $\Delta$  - допустимое значение относительной переходной погрешности;  $\varepsilon$  - допустимое значение относительной частотной погрешности;  $\gamma_n$  - безразмерная относительная ширина полосы пропускания частот;  $t_n$  - относительная длительность переходного процесса;  $h_0$  - относительная переходная функция. Алгоритм на рисунке 9а соответствует случаю, когда критерием синтеза является минимальная ДПП ( $t_n = \min$ ) и заданное значение ширины ППЧ ( $\omega_n = \omega_{n3}$ ). Алгоритм на рисунке 9б, позволяет определить значения  $\omega_0$ ,  $a1$  и  $a2$ , при которых обеспечивается максимальная ширина ППЧ ( $\omega_n = \omega_n \max$ ) при заданной ДПП ( $t_n = t_{n3}$ ). На основе описанных алгоритмов получены параметры передаточной функции датчика в MathCAD.



В третьей главе разрабатывается системная модель дифференциально – емкостного первичного преобразователя давления (емкостной ячейки), обеспечивающая решение задачи структурно - параметрического синтеза и анализа статических и динамических характеристик. Модель дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления разработана с использованием средств MATLAB и Simulink. Модель учитывает погрешности параметров и действие таких внешних факторов как статическое давление, присутствующее в системе измерения, температуру окружающей среды, а также не идеальность технологии изготовления преобразователей, выраженную в смещении нуля выходного сигнала. Входным сигналом является давления P1 и P2, действующие на ячейку, выходной сигнал разность емкостей  $\Delta C$ . Полученные характеристики являются исходными данными для следующего этапа проектирования.

Системная модель первичного преобразователя, представленная на рисунке 10, является оригинальной системой, которая состоит из нескольких подсистем, разработанных с помощью средств Simulink. В результате моделирования получено, что максимальная нелинейность статической характеристики первичного преобразователя равна 2,562%, дополнительная температурная приведенная погрешность не превышает 0,012%/10<sup>0</sup>С

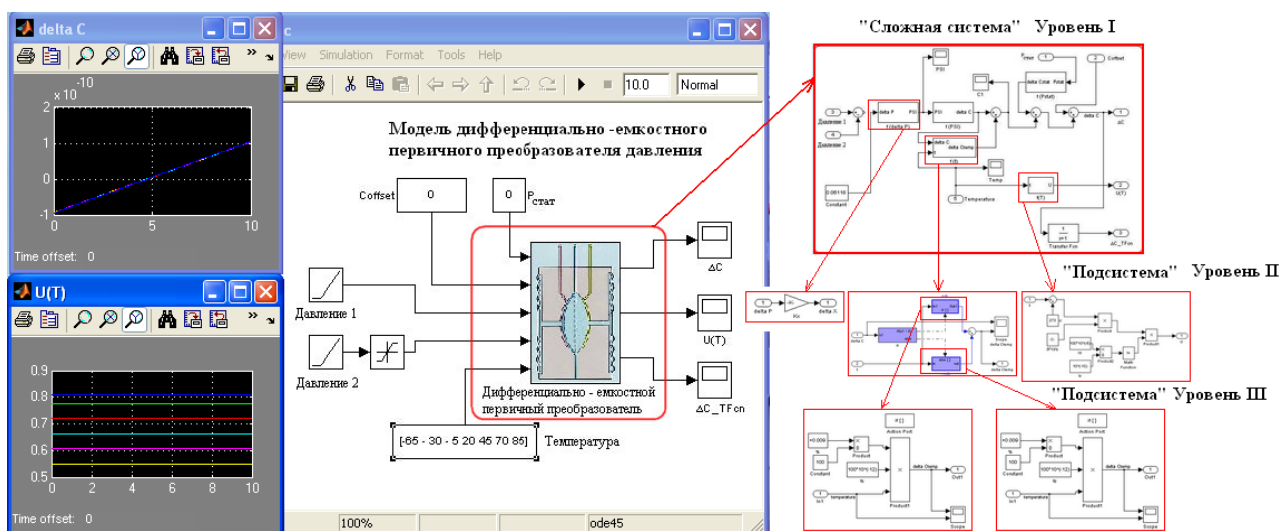


Рисунок 10 – Системная модель дифференциально - емкостного первичного преобразователя давления

В разработанной системной модели схемы преобразования электрического сигнала используется метод измерения емкости с помощью подсчета времени, требуемого на заряд и разряд конденсаторов. В качестве её реализации выбран АЦП PS021 фирмы ACAM (Германия). Модель обеспечивает решение задачи структурно - параметрического синтеза и анализа статических и динамических характеристик. Модель позволяет выполнить

анализ режимов работы и решить задачи синтеза номиналов элементов электронной схемы преобразования емкостного сигнала с учетом допусков. Входными данными являются полученные на предыдущем этапе проектирования значение разности емкостей  $\Delta C$  и характеристика температурного сенсора. Полученные в результате моделирования характеристики: цифровые коды  $P_{code}$  и  $T_{code}$  соответственно о величине измеряемого давления и температуры окружающей среды. Показанный на рисунке 11 блок АЦП представляет собой оригинальную систему, которая состоит из нескольких подсистем.

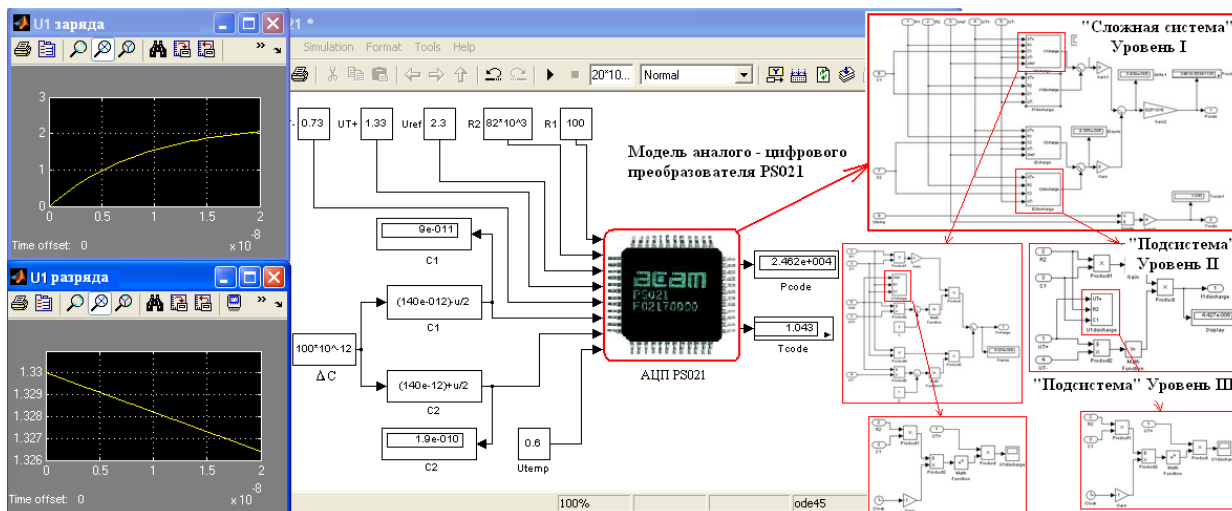
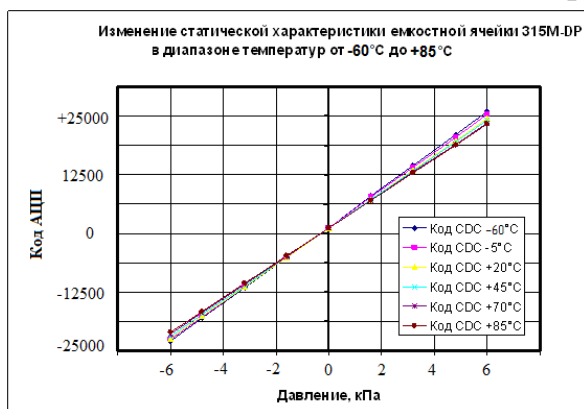
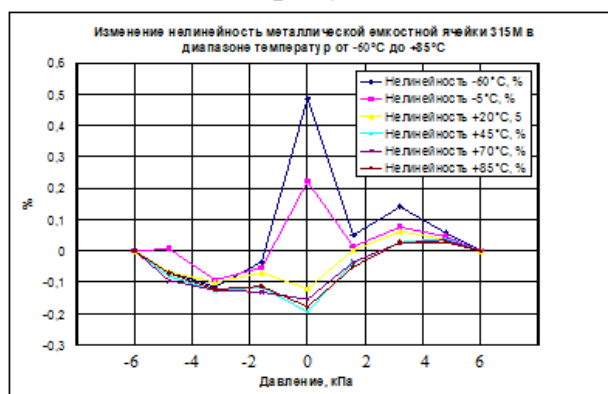


Рисунок 11 – Системная модель схемы преобразования электрического сигнала

С учетом полученных моделей, был изготовлен макет датчика давления. В состав макета входит дифференциально-емкостной преобразователь 315M-DP производитель VMC Sensors (Бельгия). Статическая характеристика исследована в диапазоне температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ . Получено: максимальная нелинейность макета равна 0,5% от ВПИ (рисунок 14а, 14б).



а)



б)

Рисунок 14 – Экспериментальная статическая характеристика макета датчика давления в диапазоне температур от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$  (а), нелинейность статической характеристики (б)

По результатам эксперимента выявлен эффект «хлопка» мембраны и разработана методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей давления не соответствующих требуемым характеристикам. Характеристики, полученные в результате моделирования и эксперимента, отличаются на 3,764 %, что говорит об адекватности разработанных моделей.

В третьей главе разработаны расчетные модели для решения задач синтеза и анализа конструкции датчика давления в САПР инженерного анализа SolidWorks. Расчетные модели позволяют выполнить анализ на действие вибраций, ударов, теплового режима. Расчетная модель представлена на рисунке 15.

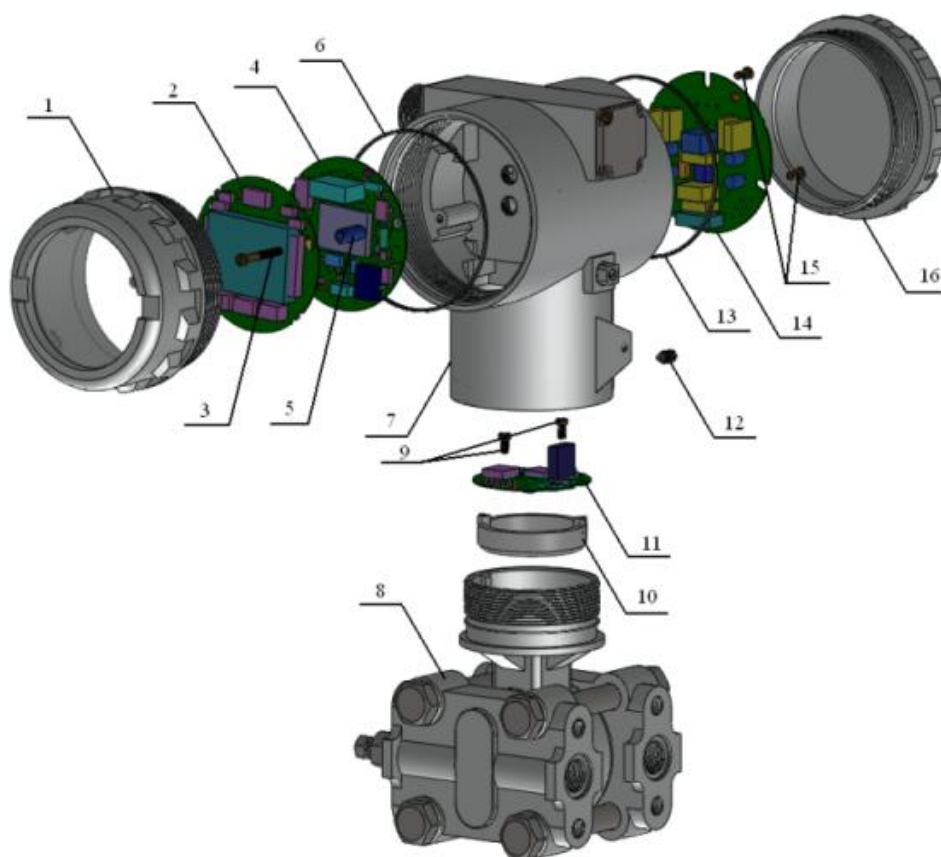


Рисунок 15 – Модель датчика для САПР инженерного анализа

Конструкция состоит из следующих элементов: 1 – передняя крышка; 2– модуль отображения и ввода информации; 3 – крепежный винт; 4 – модуль обработки информации; 5 – втулка №1; 6 – уплотнительное кольцо передней крышки; 7 – корпус электронного блока; 8 – первичный преобразователь давления; 9 – крепежные винты; 10 – втулка №2; 11 – модуль обработки сигналов первичного преобразователя; 12 – стопорный винт; 13 – уплотнительное кольцо задней крышки; 14 – модуль электромагнитной совместимости; 15 – крепежные винты; 16 – задняя крышка.

На рисунке 16 показаны возможности модели (деформации конструкции).



Рисунок 16 – Результаты моделирования

Анализ теплового режима проводился при температуре окружающей среды равной  $+85^{\circ}\text{C}$ . По результатам моделирования получено, что самым нагретым элементом является транзистор BSP129 в корпусе SOT223, его температура равна  $+102,7^{\circ}\text{C}$ . Результаты представлены на рисунке 17.

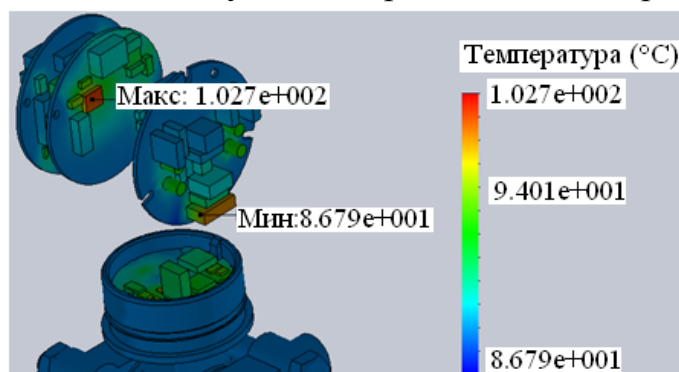


Рисунок 17 – Результаты теплового анализа

**В четвертой главе** представлена методика проектирования для выделенного класса датчиков давления на основе разработанных системных и структурно – параметрических моделей для синтеза и анализа проектных решений, учитывающих возможность интеграции САПР. Предложенная методика позволяет:

- эффективно решать задачи синтеза и анализа проектных решений с учетом заданных ограничений для выделенного класса датчиков давления;
- учитывать в системной модели датчика давления совместное влияние нелинейности характеристик элементов, внешние воздействующие факторы, допуски на параметры.

Используя предложенную методику возможно разработать быстрый прототип датчика давления. Реализованный, согласно предложенной методике, маршрут проектирования датчика давления представлен на рисунке 18.

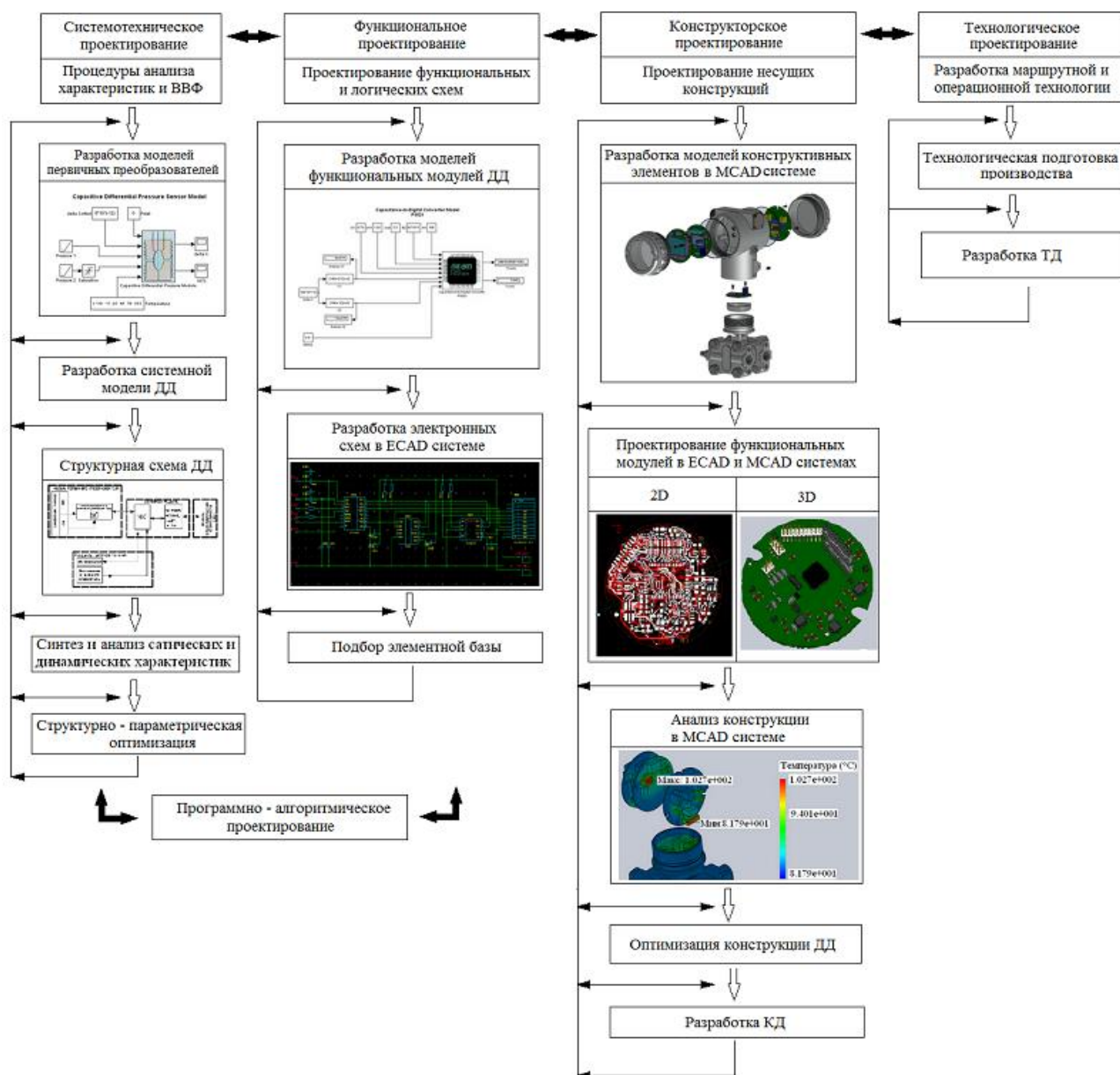


Рисунок 18 – Реализация маршрута проектирования датчика давления

Адекватность разработанной методики и точность результатов, получаемых с использованием предложенных моделей и алгоритмов подтверждены результатами экспериментальных исследований макета датчика давления. По результатам испытаний установлено соответствие макета требованиям к воздействиям вибраций и ударов, воздействию температур. Дополнительная температурная приведенная погрешность не превысила  $0,019\%/10^0\text{C}$ . Точность моделирования температурного режима датчика давления составила 95,5 %. Общее расхождение данных, полученных на основе предложенных моделей и при эксперименте не более 6,5%. Прогнозируемое снижение длительности проектирования датчика давления на 15-20%.

## **Основные результаты диссертационной работы**

1. Разработаны системные и структурно - параметрические модели дифференциально – емкостного первичного преобразователя давления и преобразования электрических сигналов, обеспечивающие автоматизированный расчет параметров статических и динамических характеристик выбранного класса датчиков давления и учитывающие действия внешних воздействующих факторов.

2. Разработаны расчетные модели для датчика давления в САПР инженерного анализа, позволяющие выполнить совместный параметрический синтез конструкции корпуса, функциональных модулей и первичного преобразователя.

3. Предложена методика проектирования для выделенного класса датчиков давления на основе разработанных моделей и алгоритмов, учитывающая возможность интеграции САПР, позволяющая эффективно решать задачи структурно-параметрического синтеза и анализа проектных решений с учетом различных критериев.

4. Методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей, выполненная на основе разработанных структурно – параметрических моделей, рекомендована для выявления не соответствующих требуемым характеристикам первичных преобразователей.

5. Результаты экспериментальных исследований методики проектирования и точности разработанных моделей, полученные с помощью натуральных испытаний, подтверждающие адекватность методики проектирования и эффективность разработанных моделей;

6. Полезная модель «Датчик давления», позволяет повысить линейность выходной статической характеристики.

## **Основные публикации по теме диссертационной работы:**

### **В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:**

1. **Никонов К.П., Орлов В.П., М.В. Фомина.** Совместное использование ЕСАД и МСАД систем при техническом проектировании датчика давления // Журнал «Приборы» 2011, №10, с.15–21.

2. **Никонов К.П., Орлов В.П.** Использование системы компьютерного моделирования matlab при проектировании датчика давления // Электронный журнал «Труды МАИ» 2012, № 61, с. 1–12.

3. **Никонов К.П.** Расчет в среде SolidWorks механических воздействий на датчик давления для испытательного оборудования авиационной техники // Электронный журнал «Труды МАИ» 2013, № 70, с. 1–20.

4. **Никонов К.П.** Исследование теплового режима датчика давления в САПР SolidWorks // Журнал «Научно-технический вестник Поволжья» 2014, № 3, с 173–176.

#### **В других изданиях:**

5. **Никонов К.П. Орлов В.П.** Проектирование конструкции датчика давления с помощью интеграции ECAD и MCAD систем // XI международная научно-практическая конференция «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения» 22 апреля 2011 года, Новочеркасск. Сборник тезисов докладов, с.45–46.

6. **Никонов К.П., Орлов В.П.** Методика проектирования датчика давления с помощью интеграции ECAD и MCAD систем // Научно-практическая конференция студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2011» 26-30 апреля 2011 года, Москва. Сборник тезисов докладов, с. 62.

7. **Никонов К.П., Орлов В.П.** Разработка интеллектуального датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем при совместном использовании сред компьютерной математики, ECAD и MCAD систем // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2012» 17-20 апреля 2012 года, Москва. Сборник тезисов докладов, с. 112-113.

8. **Никонов К.П.** Проектирование интеллектуального датчика давления с применением системы MATLAB // XIII международная научно-практическая конференция «Микропроцессорные, аналоговые и цифровые системы: проектирование и схемотехника, теория и вопросы применения» 23 апреля 2013 года, Новочеркасск. Сборник тезисов докладов, с. 33-34.

9. **Никонов К.П.** Разработка моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений датчика давления летательного аппарата // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2014» 22-24 апреля 2014 года, Москва. Сборник тезисов докладов, с. 166-167.

#### **Патенты:**

10. **Никонов К.П., Никонова П.В.** Патент на полезную модель №132551 «Датчик давления» от 20 сентября 2013 г.