

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
Орлов Валерий Павлович

Москва 2015 г.

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Анализ предметной области. Постановка задач исследования.....	14
1.1 Системный подход к проектированию электронных устройств.....	14
1.2 Обзор проектных задач, возникающих при разработке датчика давления.....	21
1.2.1 Требования, предъявляемые к датчикам давления.....	21
1.2.2 Проектные задачи интеллектуального датчика давления.....	23
1.3 Анализ первичных преобразователей давления.....	26
1.4 Выводы к главе.....	34
Глава 2. Автоматизация проектирования статических и динамических характеристик датчика давления.....	36
2.1 Реализация системного подхода при проектировании статических и динамических характеристик датчика давления.....	36
2.2 Автоматизация проектирования статической характеристики датчика давления.....	36
2.2.1 Структурно - параметрическая модель для синтеза и анализа статической характеристики датчика давления.....	37
2.2.2 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом интерполяции.....	41
2.2.3 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом наименьших модулей....	42
2.2.4 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом наименьших квадратов.	46
2.3 Автоматизация проектирования динамических характеристик датчика давления.....	51
2.3.1 Структурно - параметрическая модель для синтеза и анализа динамических характеристик датчика давления.....	51
2.3.2 Анализ переходной функции класса датчиков давления.....	54

2.3.3 Анализ частотных динамических характеристик класса датчиков давления.....	56
2.3.4 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров передаточной функции класса датчиков давления по критерию минимальной длительности переходного процесса.....	58
2.3.5 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров передаточной функции класса датчиков давления по критерию максимальной ширины полосы пропускания частот.....	63
2.4 Выводы к главе.....	68
Глава 3. Разработка системных и расчетных моделей для синтеза и анализа проектных решений датчика давления.....	70
3.1 Разработка системной модели для синтеза и анализа статических и динамических характеристик дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления.....	70
3.2 Разработка системной модели для синтеза и анализа статических и динамических характеристик преобразователя электрических сигналов.....	79
3.3 Разработка расчетных моделей для синтеза и анализа конструкции датчика давления с помощью интеграции ECAD и MCAD систем.....	85
3.4 Синтез и анализ конструкции датчика давления на воздействие механических факторов в САПР SolidWorks.....	91
3.5 Анализ теплового режима датчика давления в САПР SolidWorks.....	97
3.6 Выводы к главе.....	101
Глава 4. Разработка методики проектирования класса датчиков давления и проверка её адекватности.....	102
4.1 Разработка методики проектирования датчика давления.....	102
4.2 Проверка адекватности предложенной методики с помощью исследование характеристик разработанного датчика давления.....	105
4.3 Испытания разработанного датчика давления на механические воздействия.....	108
4.4 Испытания разработанного датчика давления на воздействие температуры..	114

4.5 Выводы к главе.....	119
Заключение.....	121
Список сокращений.....	122
Библиографический список.....	124
Приложение А. Приложение к главе 1.....	131
Приложение Б. Приложение к главе 2.....	140
Приложение В. Приложение к главе 3.....	145
Приложение Г. Патент на полезную модель.....	148
Приложение Д. Акт о практическом применении результатов диссертационного исследования.....	149

Введение

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.

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.

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.

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. Структурно – параметрические модели дифференциально – емкостного первичного преобразователя давления и модуля преобразования электрических сигналов в цифровой код, позволяющие рассчитывать в MATLAB, MathCAD статические и динамические характеристики датчика давления, проводить расчет параметров этих элементов и датчика давления с учетом внешних воздействующих факторов.

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 в цифровой код и микроконтроллера для различных случаев функции плотности распределения вероятностей погрешности при ограничении на заданную точность, длительность переходного процесса и ширины полосы пропускания частот.

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%.

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.

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».

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на 2 международных и 3 российских научно-технических конференциях. Основное содержание диссертации изложено в 9 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.

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

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.

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 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.

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. При этом подсистемы являются частными макромоделями для выбора проектного решения. Процедуры синтеза и анализа выполняются с разработанной макромоделью.

Также в данной главе для выделенного класса датчиков обоснованы основные требования. Для обеспечения 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.

Статические характеристики дифференциально-емкостного первичного преобразователя и схемы преобразования электрических сигналов в цифровой код обычно нелинейные, как результат - общая статическая характеристика датчика давления $y_{\text{н}} = f(\Delta P)$ 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 первой главе поставлены задачи диссертационного исследования.

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

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 $x_n \leq x \leq x_в$ 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. Модели для реализации разрабатывались в MathCAD.

Рассчитана передаточная функция для класса датчиков давления. 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 $a2$ используют критерии минимальной длительности переходного процесса t_n , при ограничении относительной переходной погрешности Δ , максимальной ширины полосы пропускания частот ω_n , при ограничении относительной частотной погрешности ε и др. Задача анализа - определить динамические характеристики датчика от параметров $\omega_0, a1$ и $a2$ его передаточной характеристики $W(p)$.

Используя модели и алгоритмы, получены оптимальные параметры статической характеристики и передаточной функции датчика давления.

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. Разработана системная модель схемы преобразования электрического сигнала в цифровой код, в качестве реализации

выбрана АЦП PS021 фирмы ACAM (Германия). Модель обеспечивает решение задачи структурно - параметрического синтеза и анализа статических и динамических характеристик.

Также в главе разработаны расчетные модели для решения задач синтеза и анализа конструкции датчика давления в САПР инженерного анализа SolidWorks. Модели была получена с помощью интеграции MCAD и ECAD систем и позволяют выполнить анализ на действие вибраций, ударов, а также анализ теплового режима. При синтезе конструкции учитываются такие параметры как резонансная частота, диапазон рабочих температур, ударное ускорение, максимальное относительное перемещение и др.

В четвертой главе разработана методика проектирования для выделенного класса датчиков давления на основе разработанных моделей и алгоритмов для синтеза и анализа проектных решений, учитывающих возможность интеграции САПР.

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. Расхождение данных, полученных на основе предложенных моделей и при эксперименте не более 6,5%. По результатам эксперимента выявлен эффект «хлопка» мембраны и разработана методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей давления не соответствующих требуемым характеристикам.

В заключение представлены результаты и сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Глава 1. Анализ предметной области. Постановка задач исследования

1.1. Системный подход к проектированию электронных устройств

В настоящее время электронные устройства (ЭУ), используемые в изделиях авиационной, ракетной и космической техники, а также при их испытаниях, относятся к сложным системам, состоящих из множества взаимодействующих подсистем. Разработка ЭУ предполагает использование системного подхода к проектированию, описанного в работах [1-5]. В рамках данного подхода проектируемое электронное устройство (система) рассматривается как единое целое, состоящее из различных подсистем с учетом связей, и обеспечивает достижение поставленных целей. Решаемые проектные задачи разбиваются на уровни, которые отличаются степенью детализации (декомпозиция проектных задач). Такое разбиение системы полностью соответствует системному подходу к проектированию [1]. На высшем уровне проектирования разрабатываемое ЭУ представляется в наименее детализированном виде. На каждом следующем уровне иерархии блоки, входящие в ЭУ, с соответствующими связями рассматриваются отдельно, подробности их описания возрастают. Таким образом, увеличивая степень детализации ЭУ, формируются проектные задачи приемлемой сложности, решаемые современными средствами проектирования.

В качестве электронного устройства в диссертационной работе рассмотрен датчик давления (ДД). Типовая блочно – иерархическая структура ДД представлена на рисунке 1.1. Современные ДД имеют не менее IV уровней проектирования. На низшем уровне проектирования разрабатываются такие детали как мембрана, сенсор, плата печатная, электрорадиоэлементы (ЭРЭ), винты, втулки и т.д. На более высоком разрабатываются узлы ДД, например первичные преобразователи, электронные модули, выполненные в виде типовых элементов замены, корпус электронных модулей. На уровне «Сборочные единицы» проектируется «Гидроблок», модуль электроники в целом и корпус всего ДД.

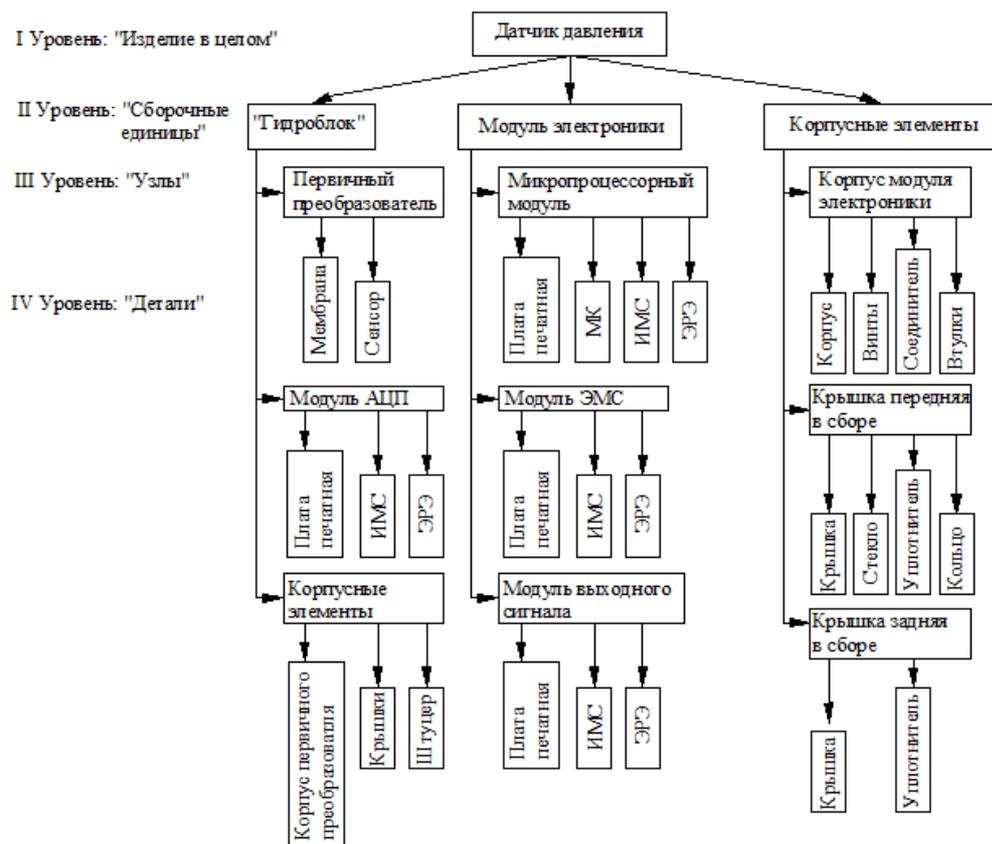


Рисунок 1.1 – Типовая блочно-иерархическая структура ДД

При проектировании ДД выделяют системотехническое, функциональное, конструкторское, программно – алгоритмическое и технологическое проектирование. На каждом этапе проектирования при выборе проектного решения возникают задачи синтеза, анализа и оптимизации [1, 6]. Задачи синтеза - определить структурную схему и (или) параметры Q_1, Q_2, \dots, Q_n всего ДД или отдельного проектного решения, при которых они имеют заданные характеристики Y_1, Y_2, \dots, Y_n . Структурный синтез - определение структурной схемы и взаимосвязей элементов ДД или отдельного проектного решения. Задача структурного синтеза является эмпирической, результат её решения во многом зависит от квалификации и опыта инженера [7]. Параметрический синтез - определение значений параметров Q_1, Q_2, \dots, Q_n ДД или отдельного проектного решения для заданной структуры, при которых выполняются условия работоспособности, определяемые выбранными или установленными критериями [6-8]. Если требуется определить наилучшее решение, то процедура синтеза

параметров называется оптимизацией. Задачи анализа - определить характеристики Y_1, Y_2, \dots, Y_n ДД или отдельного проектного решения, имеющего известные структурную схему и параметры Q_1, Q_2, \dots, Q_n , а также оценить степень выполнения требованиям технического задания (ТЗ) при учете погрешностей параметров Q_1, Q_2, \dots, Q_n и параметров ВВФ Z_1, Z_2, \dots, Z_n . В ходе проектирования задачи анализа и синтеза выполняются многократно, проектирование ДД имеет итерационный характер.

Особенностью процедуры проектирования современного ДД является совместное проектирование первичного преобразователя, аналогового и цифрового фрагмента, несущих конструкций [9-12]. Используемые средства проектирования тесно связаны с выбором конкретной САПР. На заключительном этапе выбора САПР приходится учитывать её возможности, особенности и в первую очередь: возможность эффективного использования конкретной САПР на различных этапах проектирования с привязкой к выбранной элементной базе; 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 информационного потока проекта. Сегодня основная часть современных САПР [13-15] обеспечивает возможность взаимного обмена (Import/Export design) проектной информацией на любом этапе проектирования. Таким образом, для синтеза и анализа проектных решений ДД требуется совместное функционирование САПР различного назначения (CAE, CAD, CAM), а также управления данными проекта в PDM. По смысловому содержанию решаемые САПР в процессе проектирования задачи и соответственно предпочтительно используемые программные продукты различаются, их можно условно разделить:

- предназначенные для системотехнического проектирования или моделирования (системы компьютерной математики и моделирования: Mathcad, MATLAB, VisSim);

- предназначенные для функционального проектирования (схемотехническое, в том числе выбор элементной базы, разработка принципиальной схемы и её моделирование: ECAD – системы Mentor Graphics, ISE WebPack, Altium Designer, PCAD, OrCAD, PSpice Optimizer, Multisym (National Instruments), TINA (Texas Instrumenst));

- предназначенные для конструирования или же технического проектирования - решают задачи компоновки схем, размещения элементов и узлов, печатных и проводных соединений, теплоотвода, защиты от внешних воздействий и т. п. На этом этапе проектирования разрабатывают техническую документацию, необходимую для изготовления и эксплуатации радиоэлектронных средств; осуществляется технологическая подготовка производства, разработка технологических процессов изготовления, создается технологическая документация. Включают специализированные перечисленные выше ECAD - системы, а также MCAD – системы Unigraphics (UGS - Unigraphics Solution), CATIA (Dessault Systemes) и Pro/Engineer (PTC — Parametric Technology Corporation), Solid Works (Solid Works Corporation), Solid Edge (UGS), Inventor (Autodesk) и ряд других. В России распространены отечественные системы Компас (Аскон) и T-Flex CAD (Топ Системы).

Система инженерного моделирования MATLAB, созданная компанией MathWorks является уникальной, т.к. ориентирована на матричные операции; имеет различные расширения (Toolbox), делающих её одновременно специализированной математической системой, предназначенной для решений научных задач; широко развитые возможности визуализации двумерных и трехмерных данных [16-18]. Пакет Simulink, встроенный в систему MATLAB, реализует принцип визуального программирования, в соответствии с которым, пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет параметрический синтез. Применяя встроенные пакеты расширения, выполняется оптимизация параметров модели для различных областей науки и техники. Опираясь на литературу [14,19,20] можно сказать, что

системы компьютерной математики и моделирования Mathcad и VisSim не обладают такими возможностями как MATLAB.

Специализированный САПР для проектирования загрузочной последовательности ПЛИС, например ISE WebPACK Design (Xilinx), Quarus(Altera), Atmel Studio IDE (Atmel), обладают такими возможностями как ввод электрической принципиальной схемы, VHDL - описание, трассировка ПЛИС, моделирование работы проекта с учетом задержек. В них предусмотрены статический, динамический и частотный виды анализа, смешанное логико-аналоговое моделирование (mixed-signal simulation), температурный и шумовой анализы, расчеты в наихудшем случае и статистический по методу Монте-Карло, спектральный анализ. Для оптимизации параметров, выполняемой градиентными методами.

С помощью MCAD систем разрабатывают трехмерную модель конструкции проектируемого ДД. Имеется возможность выполнить анализ разработанной конструкции на воздействия внешних факторов (температуры, вибраций и ударов), провести оптимизацию конструкторских параметров. Например, в САПР SolidWorks анализ проводится методом конечных элементов. После определения всех ограничений создается сетка конечных элементов. Варьируя параметры сетки (размер элемента, число элементов в окружности, коэффициент увеличения элемента и количество точек Якобиана), можно существенно уменьшить длительность вычислений. Однако следует учитывать, что точность результатов моделирования при этом будет снижена. При проектировании следует выбирать компромиссное решение. С помощью MCAD систем разрабатывают техническую документацию, необходимую для изготовления и эксплуатации ДД; осуществляется технологическая подготовка производства, разработка технологических процессов изготовления.

Одна из основных задач, возникающих при проектировании ДД – это разработка печатных плат (ППл) электронных модулей. Автоматизация осуществляется с помощью ECAD систем сквозного проектирования электронных устройств. Основные системы сквозного проектирования электронных устройств

на базе печатных плат компании, поддерживающие создание проектов, от принципиальной схемы и VHDL-описания ПЛИС до получения файлов для производства, а также позволяют выполнить анализ целостности сигналов, моделирование схем являются Altium Designer компании Altium, OrCAD, Allegro компании Cadence, P-CAD а также САПР компании Mentor Graphics имеет программные комплексы проектирования печатных плат Expedition PCB и PADS PowerPCB, DxDesigner или DesignCapture. В таблице А.1. представлены основные САПР для разработки моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений ДД.

В соответствии с изложенными задачами проектирования, на рисунке 1.2 представлен современный информационный поток проекта [9], включающий концептуальный уровень проектирования (моделирование в среде MATLAB), последующее схмотехническое проектирование в среде Mentor Graphics и разработка конструкции - САПР Solid Works.



Рисунок 1.2 – Современный информационный поток проекта

Из анализа САПР для разработки моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений ДД можно сделать вывод, что большинство САПР предполагает параметрическую оптимизацию [2-5,21]. Имея заданную структуру и используя выбранный критерий соответствия, они определяют оптимальные

параметры некоторого проектного решения. При этом не решаются проблемы синтеза структуры и выбора её оптимального варианта, так как оптимизация выполняется на предварительно установленной структуре, которая не меняется в ходе синтеза [8,21].

Таким образом, возникает проблема структурно-параметрического синтеза сложной системы, одновременного выбора оптимальной структуры и параметров подсистем. Следовательно, разработка моделей и алгоритмов для синтеза и анализа проектных решений ДД является актуальной проблемой. При системном подходе к моделированию модель ДД представляет собой агрегативную систему, которая разбивается на конечное число подсистем (агрегатов), сохраняя при этом связи, обеспечивающие их взаимодействие. В результате сложная система представляется в виде иерархической структуры из объединенных подсистем различных уровней (рисунок 1.1). Соответствующим образом изменяется перечень задач синтеза и анализа частных проектных решений, требующих различных показателей предпочтения. При этом подсистемы являются частными макромоделями для выбора проектного решения. Для выбора альтернатив необходимы различные взаимоисключающие комплексные показатели предпочтения. При выборе решения используется критерий соответствующий критерий, описанный в [22]. Процедуры синтеза и анализа выполняются с разработанной макромоделью (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Схема синтеза и анализа проектного решения при использовании макромоделей подсистемы

Тогда маршрут синтеза и анализа проектного решения будет выглядеть как на рисунке 1.4. В маршруте учитываются внешние воздействующие факторы.

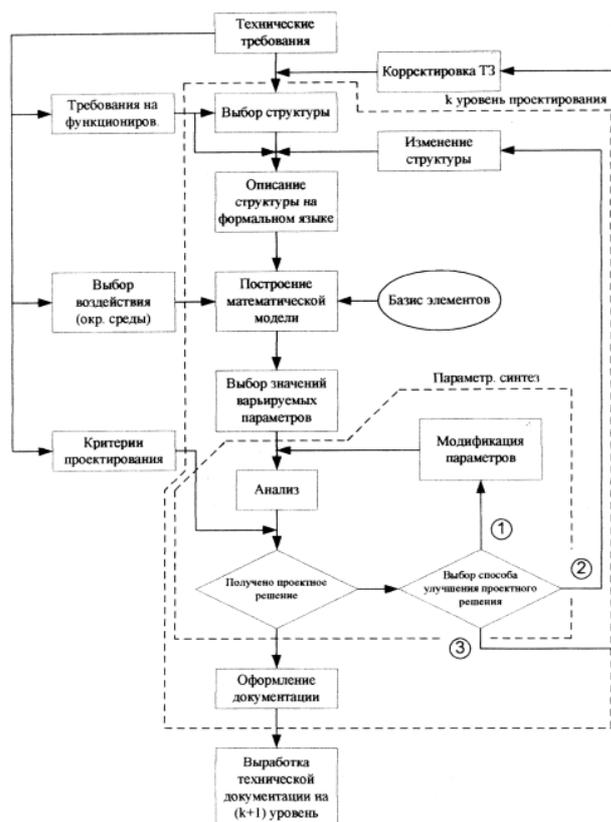


Рисунок 1.4 – Модернизированный маршрут синтеза и анализа проектного решения

Данный маршрут описан в [11, 23] и соответствует выбору проектного решения, как функциональных элементов ДД, так и их конструкции. Полученные характеристики и параметры (результаты моделирования) являются исходными данными для следующего уровня проектирования.

1.2. Обзор проектных задач, возникающих при разработке датчика давления

1.2.1. Требования, предъявляемые к датчикам давления

В информационно – управляющих системах (ИУС), используемых при испытаниях и эксплуатации изделий наземной, морской, авиационной, ракетной и космической техники, в ряду измеряемых физических параметров доля параметра «давление» занимает существенную часть от их общего числа. Значения давлений представляет широкий диапазон от вакуума до сверхвысоких значений. Являясь

параметром процесса, может быть медленно меняющимся в случае статического давления, либо быстроизменяющимся в случае динамического давления.

Для измерения давления, разности давлений и расхода газа, пара или жидкости, уровня и плотности жидкостей, определения высоты и скорости полета летательного аппарата (задачи функционально связанные с измерением давления) используются ДД. По типу измеряемого давления ДД можно разделить на разности, избыточного и абсолютного давления, разрежения, давления-разрежения и гидростатического давления. Требования к ДД по величине измеряемого давления, точности измерения, статическим и динамическим характеристикам представлены в таблице А.2 приложения А. Следовательно, возникают такие проектные задачи как обеспечение заданной точности, статических и динамических характеристик.

В зависимости от объекта, на котором эксплуатируется ДД, и тактики его использования изменяются внешние воздействующие факторы (ВВФ). По виду объекта установки ДД можно разделить на три класса: стационарные, портативные и транспортируемые [24], они представлены на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 – Классы ДД по виду установки

Особенно стоит выделить транспортируемый класс ДД, устанавливаемых на борту самолётов, ракет, космических аппаратов, а также используемых при испытаниях перечисленной техники. Особенностью их эксплуатации является

повышенное воздействие механических факторов. Для предупреждения повреждений ДД необходимо решить проектную задачу по оптимизации его конструкции. Собственные резонансные частоты конструкции ДД в сборе или его отдельных частей должны находиться вне диапазона частот вибраций того транспортного средства, на котором они эксплуатируются или перевозятся. ВВФ, воздействующие на ДД, представлены в таблице А.3 приложения А, более подробные данные можно найти в [24-27].

В случае, если ДД предназначены для использования во взрывоопасных средах газа, пара или тумана, они должны иметь взрывозащитную конструкцию. Обычно ДД имеют исполнение с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка “d”» и «искробезопасная электрическая цепь “i”», также могут быть и другие виды взрывозащиты, перечисленные в [28, 29]. ДД должны быть устойчивы к электромагнитным помехам и соответствовать требованиям электромагнитной совместимости, обладать высокой надежностью. Требования по надежности представлены в таблице А.4.

В настоящее время к ДД предъявляется требование наличия следующих сервисных функций: отображение информации на дисплее, управление настройками с внешней или внутренней клавиатуры, перестройка диапазона измерения, подстройка нуля и максимума, изменение вида выходного сигнала и др. При этом максимальный ток потребления может быть ограничен до 3,5 мА. В таблице А.5 приложения А представлены варианты выходных сигналов ДД. Кроме требований на стойкость к ВВФ решаются проектные задачи по обеспечению эргономических, функциональных и экономических требований. В связи с этим возникают различные варианты конструкций. Варианты конструкции ДД представлены в приложении А на рисунках А.1 и А.2.

1.2.2 Проектные задачи при разработке интеллектуального датчика давления

Согласно [31] интеллектуальный датчик – это адаптивный датчик с функцией метрологического самоконтроля (рисунок 1.6). Адаптивность является

проектной задачей и заключается в возможности изменять параметры и/или алгоритмы работы в процессе эксплуатации в зависимости от сигналов, содержащихся в нем преобразователей. Автоматическая проверка исправности датчика, осуществляется с использованием принятого опорного значения (измерительного преобразователя или меры) или выделенного дополнительного параметра выходного сигнала.



Рисунок 1.6 – Функциональность интеллектуального ДД

Цель изменения параметров и/или алгоритмов работы датчика в процессе эксплуатации - это повышение точности и/или достоверности результатов измерений. Обладая микропроцессорной системой, интеллектуальный датчик позволяет осуществлять:

1. Автоматическую коррекцию погрешности, появившейся в результате воздействия внешних факторов (температура, магнитные поля, угол наклона первичного преобразователя и т.д.), используя обратную связь. Для обеспечения температурной компенсации используется внутренний температурный сенсор, который может быть конструктивно выполнен в виде диода, резистора, термопары и т.д. Для коррекции выходного сигнала ДД при изменении угла наклона первичного преобразователя применяется акселерометр.

2. Самовосстановление при возникновении единичного дефекта в датчике, т.е. автоматическое исправление последствий возникновения дефекта, например использование резервного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) при выходе из строя основного.

3. Самообучение, включающее автоматическую оптимизацию параметров и алгоритмов работы. В качестве примера можно привести интеллектуальный ДД со встроенным акселерометром. Внешний воздействующий фактор - вибрации. Используя акселерометр, можно определить частоту и амплитуду вибрационных воздействий и после накопления определенного количества данных, внести изменения в параметры фильтра выходного сигнала.

Интеллектуальный датчик представляет собой совокупность программно-аппаратных средств, включающих первичный измерительный преобразователь (ПП), схему включения (СВ) ПП, которая обычно реализована совместно с (АЦП) [32], микропроцессор для математической обработки данных и схему формирования выходных сигналов. Также датчик может включать схему для отображения и ввода информации и схему электромагнитной совместимости (ЭМС) [33]. Выбор структурной схема является одной из наиболее сложной из проектных задач. Типовая структурная схема интеллектуального ДД представлена на рисунке 1.7.

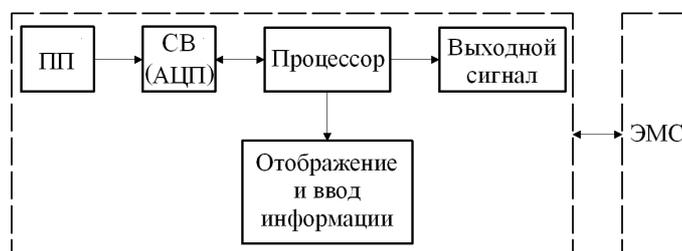


Рисунок 1.7 – Типовая структурная схема интеллектуального ДД

В соответствии с системным подходом и маршрутом проектирования, описанными в пункте 1.1, в диссертационной работе рассматривается класс датчиков давления для авиационной, ракетной и космической техники. Основные требования, предъявляемые к данному классу датчиков, представлены на рисунке 1.8.

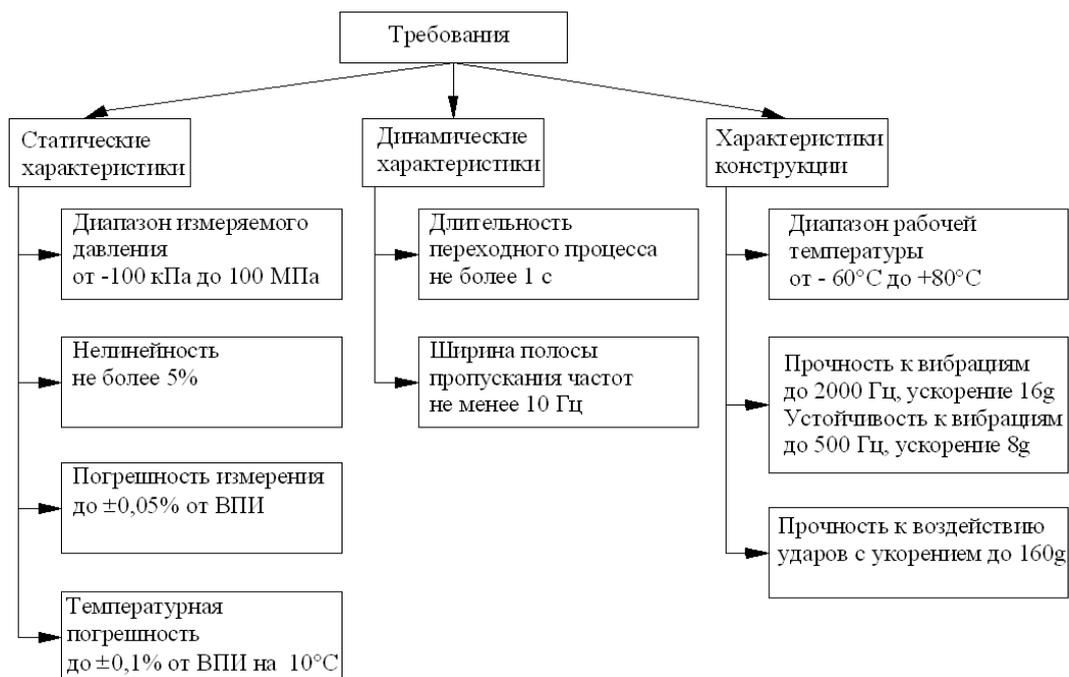


Рисунок 1.8 – Основные требования, предъявляемые к классу датчиков, разрабатываемых в диссертационной работе

Более подробные требования указаны в таблицах А.2 и А.3 приложения А.

Для обеспечения указанных требований необходимо выполнить анализ первичных преобразователей давления и выделить соответствующие. Необходимо разработать макромодели подсистем ДД и алгоритмы, позволяющие на стадии проектирования реализовать задачи синтеза и анализа их статических и динамических характеристик. Для обеспечения требований к конструкции необходимо разработать и исследовать в САПР инженерного анализа макромодели конструкции корпуса, печатных плат и первичного преобразователя для выбранного класса ДД, обеспечивающие синтез и анализ их конструкторских параметров.

1.3 Анализ первичных преобразователей давления

Основной проектной задачей при разработке ДД является выбор или разработка первичного преобразователя. В первичном преобразователе давление преобразуется в электрический сигнал. Первичный преобразователь выполняет наиболее ответственные функции в ДД, от него зависит стабильность

характеристик и точность измерения прибора [34]. Первичные преобразователи можно классифицировать по принципу преобразования давления в электрический сигнал. Наиболее часто используемыми являются следующие классы первичных преобразователей: 1. Емкостной; 2. Вибрационно-частотный; 3. Тензометрический и пьезорезистивный; 4. Индуктивный и индукционный; 5. Ионизационный; 6. Пьезоэлектрический и др.

Емкостные преобразователи давления используют метод изменения емкости конденсатора. При воздействии на один из параметров, изменяющих электрическое поле между двумя проводниками, образующими две обкладки конденсатора, изменяется значение емкости ΔC . Таким параметром, может быть площадь поверхности S обкладки конденсатора, расстояние между обкладками D (случай двух параллельных электродов) или, наконец, характеристики среды (введение твердого диэлектрика между обкладками) [35]. При малом изменении расстояния D между обкладками ($\Delta d \ll D_0$), то значение емкости C изменяется линейно [7]:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = -\frac{\Delta d}{D_0}, \quad (1.1)$$

где ΔC - изменение емкости,

C_0 - начальное значение емкости,

Δd - изменение расстояние между обкладками конденсатора,

D_0 - начальное расстояние между обкладками.

Для измерения разности давлений применяют дифференциально-емкостные преобразователи давления (емкостные ячейки) (рисунок 1.9). Конструктивно они изготовлены так, что при увеличении давления, емкость одного конденсатора увеличивается, а другого уменьшается, принцип действия описан в [35]. Выходным сигналом является разность емкостей ΔC между чувствительной мембраной и электродами. Благодаря этому увеличивается чувствительность преобразования, появляется возможность для измерения сверхмалого и малого давления (от сотых долей кПа до единиц кПа), уменьшается ряд синфазных погрешностей.

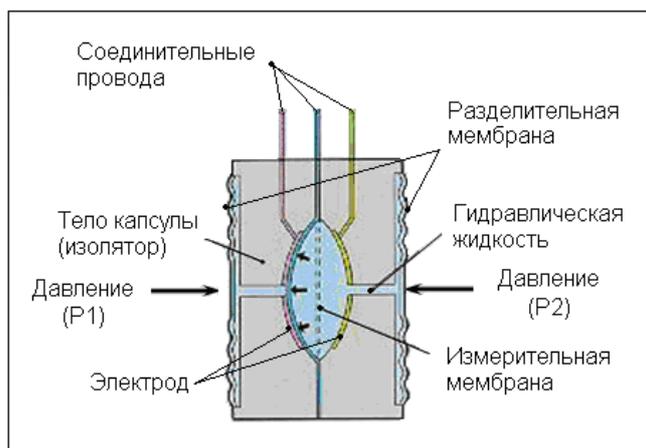


Рисунок 1.9 – Дифференциально - емкостной преобразователь давления

В связи с малым перемещением ΔX центра упругого элемента (от 1 мкм до 1 мм) [35 - 37], гистерезис у таких чувствительных элементов должен быть меньше, а стабильность характеристик выше. Зависимость разность емкостей ΔC от перемещения мембраны практически линейна[37]:

$$\Delta C = \frac{\varepsilon_0 a}{D_0} \cdot (\varepsilon_r - 1) \cdot \Delta X, \quad (1.2)$$

где a — ширина обкладок,

D_0 — расстояние между ними,

ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость,

а $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Одна из первых фирм, которая начала серийный выпуск емкостных ячеек — это Rosemount, США. Также известны такие производители емкостных преобразователей давления как VCM Sensor, Бельгия; В Sensor, Китай; Endress & Hauser, Германия; SENSE, Франция. В России в настоящее время емкостные ячейки серийно не производятся. В приложении А на рисунке А.3 представлены конструкции ДД Cerabar S PMC71 и Ceraphant T PTC31 первичным преобразователем которых является емкостная ячейка. Достоинства и недостатки дифференциально-емкостного преобразователя представлены в приложении А в таблице А.5.

Принцип действия вибрационно-частотных преобразователей основан на изменении собственной частоты f колебаний балки (струны) при изменении силы

её натяжения, которое вызвано воздействием давления P на мембрану преобразователя [34, 40-42]. В случае натяжения струны её собственная частота увеличивается, при ослаблении уменьшается:

$$f \approx \frac{h}{l^2} \cdot \frac{a}{t} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot P}{\rho} \cdot \left(1 + k \cdot \frac{1}{h^2}\right)}, \quad (1.3)$$

где h, l – толщина и длина балки резонатора,

E, ρ – модуль упругости и плотность материала балки,

a, t – радиус и толщина мембраны,

k – постоянный коэффициент.

ДД, основанные на данном способе преобразования, хорошо себя зарекомендовали, однако, не получили дальнейшего развития из-за чувствительности к ударам и вибрациям [35,40,43,44].

Японская компания Yokogawa, используя кристаллические структуры, разработала вибрационно-частотный преобразователь Н-образной формы (рисунок 1.13).

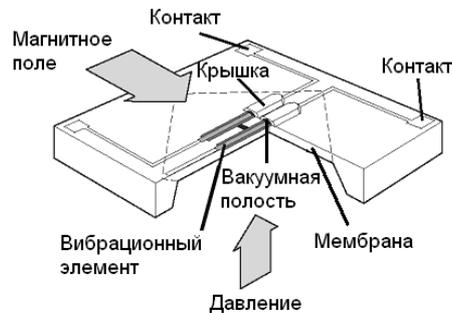


Рисунок 1.13 – Кристалл вибрационно-частотного преобразователя давления

Вибрационно-частотный преобразователь Н-образной формы представляет собой две балки размерами несколько десятков микрон, соединенные перемычкой и выполненные в виде единого монокристалла кремния. Одна балка необходима для возбуждения колебаний, которые передаются через перемычку на вторую балку, на выходе которой возникает электродвижущая сила (ЭДС). После усиления ЭДС возвращается обратно на вход схемы, устанавливаются устойчивые

автоколебания системы на частоте, близкой к частоте собственных колебаний, зависящих от измеряемого давления [42].

В ДД EJA и EJX, японской фирмы Yokogawa первичный преобразователь давления состоит из двух вибрационно-частотных преобразователей и одного температурного сенсора, выполненных на одном монокристалле кремния [44, 45]. Такая мультисенсорность позволяет измерять разность давлений, статическое давление и температуру первичного преобразователя. Конструкция ДД EJX430 и EJA530 представлена на рисунке А.4.

Среди вибрационно-частотных преобразователей давления можно привести в пример цилиндрический резонатор, принцип действия которого основан также на изменении частоты собственных колебаний из-за появления в его стенке сжимающих механических напряжений под действием приложенного давления. Частота собственных колебаний резонатора f_x изменяется по формуле

$$f_x = f_0 \sqrt{1 - k_x P}, \quad (1.4)$$

где f_0 - начальная частота, зависящая от размеров и свойств материала резонатора,

$k_x = 1/P_k$ - постоянный коэффициент.

Ещё одним видом вибрационно-частотных преобразователей давления является кварцевый резонатор, который также меняет собственную частоту колебаний при деформации. Достоинства и недостатки вибрационно-частотных преобразователей представлены в приложении А в таблице А.5.

Тензометрические преобразователи основаны на явлении тензоэффекта – изменения активного электрического сопротивления проводников при их механической деформации. Основная характеристика тензоэффекта – коэффициент относительной тензочувствительности, равный отношению изменения сопротивления проводника к изменению его длины [37]:

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L}, \quad (1.5)$$

где $\varepsilon_R = \Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления;

$\varepsilon_L = \Delta L/L$ – относительное изменение длины.

Измерительный преобразователь, изменяющий свое электросопротивление при деформации, называется тензорезистором. Для измерения давления тензорезисторы, обычно включенные в четыре плеча мостовой схемы, располагают на участках упругого чувствительного элемента, подверженных деформации. Разбаланс моста линейно зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от величины измеряемого давления.

При изменении натяжения полупроводниковых пьезорезисторов, изменяется значение их удельного сопротивления. Значения удельного сопротивления расположены в широком диапазоне, охватывает почти 10 порядков [37]. Эпитаксиальные полупроводниковые тензорезисторы получают путем осаждения кремния на изолирующую подложку из сапфира. Далее готовую сборку припаивают твёрдым припоем к металлической мембране, например титановой (рисунок 1.15). Такие преобразователи получили название кремний на сапфире (КНС) [33,35, 46].

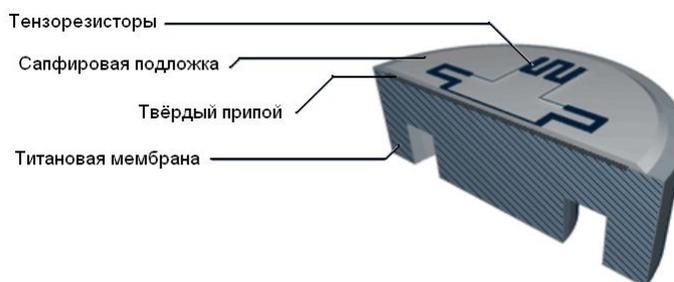


Рисунок 1.15 – Полупроводниковый тензопреобразователь со структурой КНС

Основное ограничение КНС преобразователя – неустранимая временная нестабильность характеристик и существенные гистерезисные эффекты от давления и температуры. Объясняется это неоднородностью конструкции и связью мембраны с конструктивными элементами датчика. В нашей стране тензопреобразователи со структурой КНС применяются в ДД ТЖИУ406, МЕТРАН, САПФИР-22.

Полупроводниковые тензорезисторы, внедряемые диффузией и ионной имплантацией, представляют собой часть монокристаллической мембраны и получили название кремний на кремнии (КНК) [35,37,48]. Монокристалл кремния устанавливается на диэлектрическое основание с использованием легкоплавкого стекла или методом анодного сращивания (рисунок 1.16).

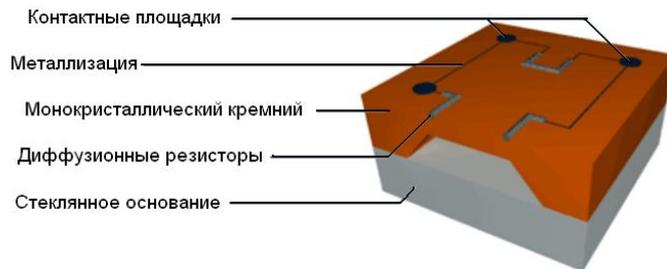


Рисунок 1.16 – Полупроводниковый тензопреобразователь со структурой КНК

Основным преимуществом тензопреобразователей со структурой КНК является более высокая стабильность характеристик, по сравнению с КНС преобразователями.

Все тензометрические преобразователи обладают общим недостатком – низким коэффициентом тензочувствительности [35,37,48]. Поэтому для измерения давления от сотых долей кПа до единиц кПа необходимо применять различные механические усилители мембранного и рычажного типа, что ухудшает стабильность характеристик ДД, увеличивает их габариты и массу. Для визуального сравнения габаритов, на рисунке 1.17 представлены гидроблок с тензометрическим преобразователем давления, используемый с ДД ТЖИУ406, номинал измеряемого давления 1,6 кПа и гидроблок с емкостным первичным преобразователем давления зарубежной фирмы VCM Sensor, модель 315M-DP, номинал измеряемого давления 1,5 кПа [49]. Масса представленного гидроблока с емкостным преобразователем давления равна 2,5 кг, а масса гидроблока с тензометрическим преобразователем давления равна 12 кг.

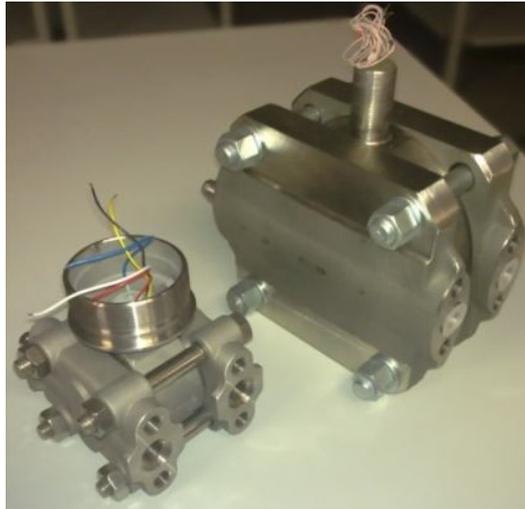


Рисунок 1.17 – Тензометрический преобразователь для ДД ТЖИУ406, и емкостной преобразователь фирмы VCM Sensor

Характеристики ДД ТЖИУ406 предприятие изготовитель ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова с тензометрических преобразователем: диапазон измеряемых давлений: от 0-0,16 кПа до 0-100,0 МПа; основная погрешность до $\pm 0,1\%$ от ВПИ; аналоговый 4-20 мА или 0-5 мА выходной сигнал с цифровым сигналом на базе HART-протокола или цифровой сигнал по протоколу Modbus RTU с линией связи RS-485; возможен во взрывозащищенном (взрывонепроницаемая оболочка 1ExdПВТ4) исполнении; диапазон рабочих температур: $-60...+80$ °С [50]. Достоинства и недостатки тензорезистивных преобразователей представлены в приложении А в таблице А.5.

Помимо представленных выше первичных преобразователей давления существуют индуктивные, индукционные, ионизационные а также пьезоэлектрические преобразователи, однако они применяются гораздо реже в силу своих особенностей конструкции. Основные достоинства и недостатки указанных первичных преобразователей давления представлены в таблице А.5. приложения А.

Дифференциально-емкостной первичный преобразователь отвечает всем современным требованиям, обеспечивает необходимую и достаточную стабильность метрологических характеристик, способен работать в условиях повышенных температур, загрязненных и агрессивных средах. Не подвержен влиянию магнитных полей в отличие от индуктивных и индукционных

преобразователей. Емкостной преобразователь обладает высокой чувствительностью, вследствие этого на малые диапазоны давлений выгодно отличается по массогабаритным характеристикам от тензорезистивных преобразователей. Конструкция дифференциально-емкостного преобразователя обеспечивает высокую устойчивость к перегрузкам по давлению и не требует дополнительных защитных механизмов. Вибрационно-частотный (Н-образный) первичный преобразователь имеет преимущества по некоторым характеристикам перед дифференциально-емкостным первичным преобразователем [42,43]. Однако сложность технологии изготовления вибрационно-частотного преобразователя и патентно-правовая защита японской фирмой Yoko-gawa не дает возможности произвести такой первичный преобразователь.

В результате сравнения первичных преобразователей давления сделан вывод, что при проектировании интеллектуального ДД целесообразно использовать дифференциально-емкостной первичный преобразователь.

1.4. Выводы к главе

В данной главе электронное устройство (датчик давления), рассматривается с позиции сложной системы. Представлена его типовая блочно-иерархическая структура. Для решения задач синтеза и анализа проектных решений используется системный подход к проектированию и моделированию. Выполнен анализ САПР для разработки моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений ДД. Представлены требования к ДД, выделен класс датчиков. Описаны возможные варианты их конструкции и структурной схемы. Дано понятие интеллектуального ДД. Проведен анализ первичных преобразователей давления.

1. Показано, что современные САПР обладают модулем параметрической оптимизации. При этом не решаются проблемы синтеза структуры и выбора её оптимального варианта, так как оптимизация выполняется на предварительно установленной структуре, которая не меняется в ходе синтеза. Описана проблема структурно-параметрического синтеза проектных решений.

2. Показано, что структурно-параметрический синтез и анализ проектных решений целесообразно выполнять с частными макромоделями подсистем ДД. Для выбора альтернатив проектного решения используется соответствующий критерий. Поэтому разработка моделей и разработка алгоритмов для синтеза и анализа проектных решений является сложной и актуальной проблемой.

3. Показано, что методика проектирования ДД обладает недостатками вызванными отсутствием полноценных моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений ДД.

4. Показано, что в качестве первично преобразователя давления следует использовать дифференциально-емкостной преобразователь, т.к. он отвечает всем современным требованиям, обеспечивает необходимую точность измерения и длительную стабильность характеристик, обладает приемлемой стоимостью.

Таким образом, необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику проектирования класса ДД, обеспечивающую структурно-параметрический синтез проектных решений, используя модели и алгоритмы при интеграции САПР инженерного анализа;

2. Разработать системные, структурно – параметрические и расчётные 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. Выполнить исследование адекватности разработанной методики, а так же точности моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений, используя натурные испытания макетного образца датчика давления.

Глава 2. Автоматизация проектирования статических и динамических характеристик датчика давления

2.1 Реализация системного подхода при проектировании статических и динамических характеристик датчика давления

При системном подходе к проектированию ДД, рассматривая его с позиции сложной системы (рисунок 1.1), следует выделить такие подсистемы как первичный преобразователь, модуль АЦП и микропроцессорный модуль. Возникает задача синтеза и анализа их статических и динамических характеристик, зависящих от физических параметров и конструкции входящих в них элементов. При оптимизации этих параметров, необходимо получить требуемые статические и динамические характеристики с учетом связей и внешних воздействующих факторов. Для выбора проектного решения используется соответствующий критерий. Необходимо разработать алгоритмы и структурно – параметрические модели для синтеза и анализа статических и динамических характеристик датчика давления.

2.2. Автоматизация проектирования статической характеристики датчика давления

Статической функцией преобразования датчика давления называется зависимость между входной величиной давления и выходным сигналом датчика, работающего в статическом режиме измерений [51, 52]. График этой зависимости называется статической характеристикой датчика давления (СХДД) и выражается функцией вида:

$$y=f(x), \quad (2.1)$$

где y - выходной сигнал датчика давления,
 x - величина входного давления.

Также различают заданную и расчетную статические характеристики датчиков давления.

Заданная (желаемая) статическая характеристика:

$$y = f_{жс}(x) \quad (2.2)$$

определяется техническим заданием на проектирование датчика давления.

Для получения расчетной статической характеристики выполняют анализа структурной схемы датчика давления при работе в статическом режиме измерений. Расчетная статическая характеристика определяется выражением:

$$y = f_p(x; q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2.3)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n - коэффициенты, зависящие от физических параметров схемы, конструкции датчика давления и внешних воздействующих факторов.

Оценить степень близости расчетной статической характеристики (2.3) к желаемой статической характеристике (2.2) можно с помощью погрешности приближения, выраженной формулой:

$$\Delta_{II}(x; q_1, \dots, q_n) = f_p(x; q_1, \dots, q_n) - f_{жс}(x). \quad (2.4)$$

Зная необходимые значения коэффициентов q_1, q_2, \dots, q_n , можно подобрать такие значения физических параметров схемы и конструкции датчика давления, при которых расчетная статическая характеристика датчика давления будет совпадать с желаемой статической характеристикой, или же погрешность приближения (2.4) не превысит допустимого значения.

Поэтому при проектировании датчиков давления необходимо решить задачи синтеза - определить параметры q_1, q_2, \dots, q_n , расчетной СХДД $f_p(x; q_1, q_2, \dots, q_n)$, при которых её отклонение от желаемой СХДД $f_{жс}(x)$ на интервале $x_n \leq x \leq x_в$ не превышает заданного значения. Здесь $x_n, x_в$ - соответственно нижний и верхний диапазон измерения датчика давления. При постановке задачи оптимизации параметров q_1, q_2, \dots, q_n , используют критерии минимума погрешности приближения $\Delta_{n \min}$ на ограниченном интервале $x_n \leq x \leq x_в$, минимума математического ожидания квадрата погрешности приближения $D(q_1, q_2, \dots, q_n)$,

функцию плотности распределения вероятностей (ФПРВ) измеряемого давления $p_x(x)$ и др.

Также решаются задачи анализа - определить расчетную СХДД $f_p(x; q_1, q_2, \dots, q_n)$, имеющего известные структурную схему и параметры q_1, q_2, \dots, q_n , оценить её отклонение от $f_{жс}(x)$ при учёте погрешностей параметров q_1, q_2, \dots, q_n и внешних воздействующих факторов (ВВФ).

Для решения поставленных задач применяются следующие методы:

1. Метод интерполяции;
2. Метод наименьших модулей (МНМ);
3. Метод наименьших квадратов (МНК).

Метод решения выбирается в зависимости от требований к величине и распределению погрешности приближения (2.4) по интервалу $x_n \leq x \leq x_6$ измерений. Другие методы решения (сплайн-аппроксимация, кусочно-линейная аппроксимация и т.д.) не позволяют получить расчетную СХДД в виде простой прямой $f_p(x) = kx + b$ или же кривой второго порядка, что ведет к усложнению расчетов и увеличению числа неизвестных параметров q_n .

2.2.1 Структурно - параметрическая модель для синтеза и анализа статической характеристики датчика давления

Структура модели для статического режима измерения выделенного класса датчиков давления представлена на рисунке 2.1. В её состав входят подсистемы первичного преобразователя, модуля АЦП и микроконтроллера, выполняющего цифровую коррекцию измерительного сигнала.

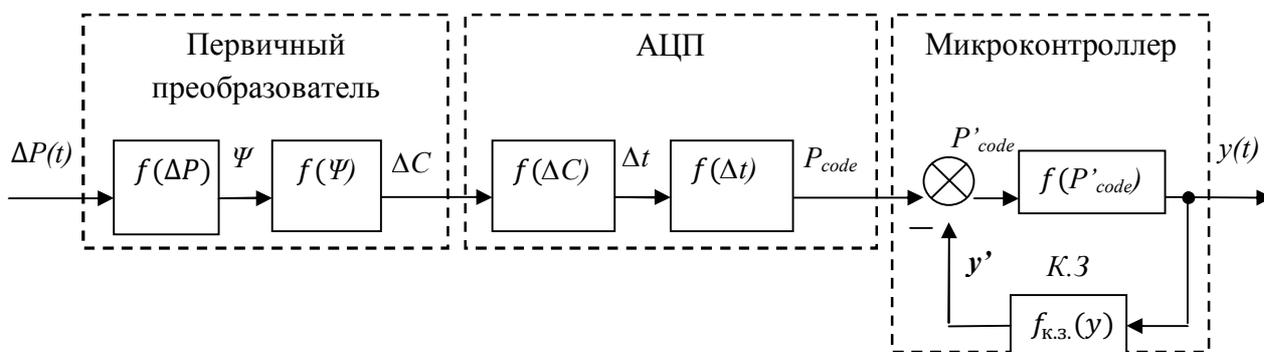


Рисунок 2.1 – Структура модели класса датчиков давления для статического режима измерения

В соответствии с конструкцией и принципом работы дифференциально-емкостного первичного преобразователя, рассмотренного в главе 1, получим его статическую характеристику. Зависимость перемещения Ψ измерительной мембраны от входного давления $P(t)$ имеет вид [51,52]:

$$\Psi = f(\Delta P) = q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}, \quad (2.5)$$

где q_1 и q_2 – коэффициенты, зависящие от физических параметров мембраны. При этом

$$q_1 = 0,2793 \cdot \frac{R^4}{E \cdot h} \text{ и } q_2 = 0,1706 \cdot \frac{R^4}{E \cdot h^3}, \text{ где} \quad (2.6)$$

R – радиус мембраны,

h – толщина мембраны,

E – модуль упругости материала мембраны.

При малом перемещении мембраны Ψ между электродами первичного преобразователя значение емкости ΔC изменяется линейно [35]:

$$\Delta C = f(\Psi) = q_3 \cdot \Psi, \quad (2.7)$$

где q_3 – коэффициент, зависящий от физических параметров конденсаторов. Вычисляется по формуле:

$$q_3 = \frac{\varepsilon_0 \cdot a}{D_0} \cdot (\varepsilon_r - 1) \quad (2.8)$$

Здесь $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м,

ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость,

D_0 - расстояние между электродами (обкладки конденсатора),

a – ширина обкладок.

Определим статическую характеристику модуля АЦП. В соответствии с принципом работы АЦП, основанного на измерении времени заряда и разряда конденсатора описанного в [55], зависимость Δt от ΔC можно записать

$$\Delta t = f(\Delta C) = q_4 \cdot \Delta C, \quad (2.9)$$

где q_4 – коэффициент, зависящий от режима работы электронной схемы модуля преобразования электрических сигналов в цифровой код, а также от номиналов радиоэлементов. Выражается формулой:

$$q_4 = 8 \cdot (R_{зар} \cdot (\ln(1 - \frac{U_{разр}}{U_{пит}}) - \ln(1 - \frac{U_{зар}}{U_{пит}}))) - R_{разр} \cdot \ln(\frac{U_{разр}}{U_{зар}}), \quad (2.10)$$

где $U_{разр}$ – напряжение, до которого разряжается конденсатор,

$U_{зар}$ – напряжение, до которого заряжается конденсатор,

$U_{пит}$ – напряжение питания схемы,

$R_{зар}$ – резистор, через который заряжается конденсатор,

$R_{разр}$ – резистор, через который разряжается конденсатор.

Далее формируется выходной код АЦП, который можно описать формулой [55]:

$$P_{code} = f(\Delta t) = q_5 \cdot \Delta t, \quad (2.11)$$

где q_5 – коэффициент пропорциональности АЦП.

Подставляя (2.8), (2.7) и (2.5) в (2.10), можно получить расчетную статическую характеристику схемы измерения датчика давления

$$f_{P_{с.и.}}(\Delta P; q_1, q_2, \dots, q_5) = q_5 \cdot q_4 \cdot q_3 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}) = q_6 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}), \quad (2.12)$$

где $q_6 = q_5 \cdot q_4 \cdot q_3$.

Параметры q_1 , q_2 изменяются, меняя размеры и свойства материала мембраны; параметр q_3 – с помощью материала диэлектрика первичного преобразователя, расстояния между электродами и их шириной; параметр q_4 – в зависимости от режима работы электронной схемы и номиналов резисторов $R_{зар}$ и $R_{разр}$. Поиск параметров q_1 , q_2 , q_3 , q_4 – задача синтеза, возникающая при проектировании выбранного класса датчиков давления.

Статическая характеристика микроконтроллера:

$$y = f(P_{code} - f_{к.з.}(y)), \quad (2.13)$$

где $f_{к.з.}(y)$ - статическая характеристика корректирующего звена.

Корректирующее звено, предназначено для устранения нелинейности статической характеристики, а также для компенсации других погрешностей (в частности температурной погрешности и погрешности от наклона первичного преобразователя).

Подставляя (2.11) в (2.12) получим общую расчетную статическую характеристику датчика давления

$$y = f((q_6 \cdot (q_2 \cdot \Delta P + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P}) - f_{к.з.}(y))). \quad (2.14)$$

2.2.2 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом интерполяции

Решая задачу синтеза методом интерполяции, параметры q_1, q_2, \dots, q_n расчетной СХДД выбирают таким образом, чтобы она совпадала с желаемой СХДД $y = f_{жс}(x)$ в точках N_1, N_2, \dots, N_n , которые являются узлами интерполяции (рисунок 2.2).

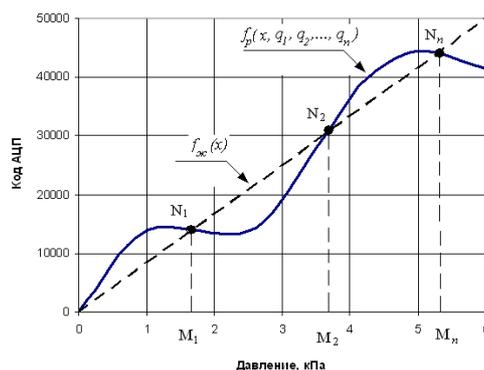


Рисунок 2.2 – Выбор точек N_1, N_2, \dots, N_3 при решении задачи синтеза методом интерполяции

Погрешность приближения (2.4) равна нулю в точках M_1, M_2, \dots, M_n . Параметры q_1, q_2, \dots, q_n рассчитываются, решая систему n алгебраических уравнений:

$$f_p(M_i; q_1, \dots, q_n) = f_{жс}(M_i) \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.15)$$

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. Главная трудность метода состоит в правильном выборе количества узлов интерполяции и правильном их размещении, для чего необходимо руководствоваться правилом Новодворского [51, 52].

Максимальная приведенная погрешность приближения (МПП) рассчитывается по формуле

$$\gamma_{п} = \frac{\Delta_{п max}}{|y_{ав} - y_{ан}|} \cdot 100\%, \quad (2.16)$$

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

2.2.3 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом наименьших модулей

В модели применяется алгоритм, основанный на методе наименьших модулей. Параметры q_1, q_2, \dots, q_n расчетной СХДД подчиняют критерию

минимакса:

$$\Delta_{Пmax} = \max_{P_n \leq P \leq P_в} \left| f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n) - f_{жс}(x) \right| = \min, \quad (2.17)$$

где P_n и $P_в$ - соответственно нижний и верхний пределы измерения датчика давления.

При этом график расчетной статической характеристики датчика давления должен находиться между двумя параллельными кривыми, которые удалены от графика желаемой характеристики на одинаковую величину $\Delta_{\text{Пmax}}$. Особенностью данного метода является то, что все экстремумы погрешности приближения равны друг другу по модулю и чередуются по знаку (рисунок 2.3). Полученная расчетная статическая характеристика $y = f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n)$ называется кривой наименьших модулей (КНМ).

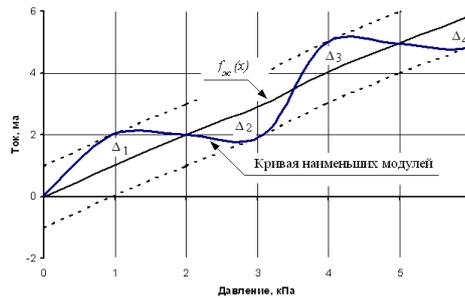


Рисунок 2.3 График КНМ

Критерий минимакса (2.17) соответствует условиям равномерного приближения:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_{\text{Пmax}} \quad (2.18)$$

$$S_k = (d\Delta y_n(P_i; \{q_i\})/dP)|_{P=P_k} = 0, \quad (2.19)$$

где Δ_j – максимальные значения модуля абсолютной погрешности приближения; S_k – значения производных от $\Delta y_n(P_i; \{q_i\})$ по P при $P=P_k$; P_k – абсциссы точек экстремумов расчетной статической характеристики.

Затем, выразив значения Δ_j и S_k через q_i и P_k , получают систему уравнений, решив которую определяют коэффициенты расчетной статической характеристики. Значение максимальной приведенной погрешности рассчитывается по формуле:

$$\gamma_n = \frac{\Delta_{\text{Пmax}}}{|y_{\text{ав}} - y_{\text{ан}}|} \cdot 100\%, \quad (2.20)$$

где $y_{\text{ав}}$ и $y_{\text{ан}}$ – граничные ординаты желаемой статической характеристики датчика давления $f_{\text{ЖС}}(x)$.

Выполним синтез параметров q_1, q_2 и q_6 расчетной статической характеристики схемы измерения датчика давления $f_{P_{с.и.}}(\Delta P; q_1, q_2, q_6)$ (2.12)

методом наименьших модулей в САПР MathCAD.

Диапазон измерения дифференциально – емкостного первичного преобразователя давления модели 315М-DP находится в пределах от минус 6 кПа до +6 кПа. Желаемой статической характеристикой схемы измерения датчика давления является:

$$f_{жс}(\Delta P) = \frac{25000}{6} \cdot \Delta P, \quad (2.21)$$

т.к. код АЦП при $\Delta P_{мин} = -6$ кПа должен быть равен -25000 единиц, а при $\Delta P_{макс} = 6$ кПа, равен +25000 единиц.

Зададимся приближенными значениями параметров $q_{1np} = 10^{-7}$, $q_{2np} = 7 \cdot 10^{-3}$ и $q_{6np} = 4.6 \cdot 10^5$, строим схематические графики желаемой статической характеристики (пунктирная прямая) и предполагаемой КНМ (сплошная кривая) (рисунок 2.4).

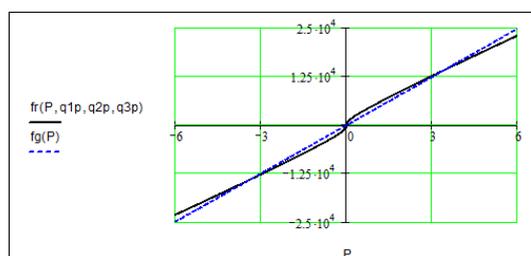


Рисунок 2.4 – График желаемой статической характеристики и предполагаемой КНМ

Далее составляем систему уравнений, в соответствии с условиями равномерного приближения (2.18) и (2.19). Система уравнений представлена в приложении Б.1.

Решая эту систему в САПР MathCAD, получаем следующие значения искомым параметров $q_1 = 9.35 \cdot 10^{-8}$, $q_2 = 7.111 \cdot 10^{-3}$, $q_6 = 4,659 \cdot 10^5$. График погрешности приближения (2.4) показан на рисунке 2.5.

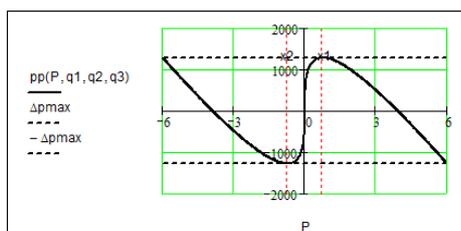


Рисунок 2.5 – График погрешности приближения

Максимальное значение погрешности приближения (2.17)

$$\Delta_{Пmax} = 1.281 \cdot 10^3$$

Строим графики желаемой статической характеристики (пунктирная прямая) и полученную КНМ (сплошная кривая) (рисунок 2.6).

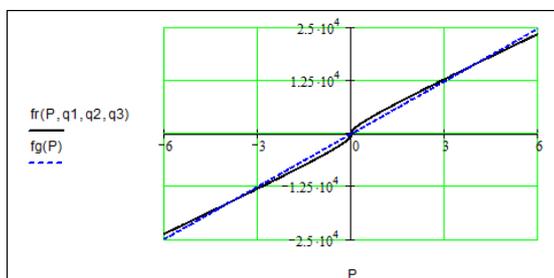


Рисунок 2.6 – График желаемой статической характеристики и полученной КНМ

Рассчитаем значение МППП по формуле (2.20)

$$\gamma_n = \frac{\Delta_{Пmax}}{|y_{ав} - y_{ан}|} \cdot 100\% = \frac{1281}{|25000 + 25000|} \cdot 100\% = 2.562\%$$

Далее выбираются необходимые значения физических параметров датчика давления, от которых зависят значения найденных коэффициентов q_1 , q_2 и q_6 . Подставляя коэффициент q_1 в формулу (2.6) можно найти радиус мембраны R , толщину мембраны h и выбрать материал мембраны с необходимым модулем упругости E . Например, если материал мембраны - сплав 36НХТЮ, модуль упругости $E = 2,15 \cdot 10^6$ кгс/см² и выбрать её толщину $h = 3$ мм, то радиус мембраны будет равен $R = 6,82$ мм.

Далее выбирая относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика дифференциально - емкостного преобразователя $\epsilon_r = 20$, расстояние между электродами $D_0 = 100$ мкм и ширину обкладок $a = 8$ мм по формуле (2.8) получим коэффициент $q_3 = 1.345 \cdot 10^{-6}$.

Исходя из электронной схемы и принципа работы АЦП, описанного в [55], задаем значение резисторов $R_{zap} = 100 \text{ Ом}$, $R_{разр} = 82 \text{ кОм}$, $U_{разр} = 0.73 \text{ В}$, $U_{zap} = 1.33 \text{ В}$, $U_{num} = 2.3 \text{ В}$ и рассчитываем по формуле (2.10) коэффициент $q_4 = 3.939 \cdot 10^5$.

Так как $q_6 = q_5 \cdot q_4 \cdot q_3$, то коэффициент пропорциональности АЦП $q_5 = 8.792 \cdot 10^5$. Этот коэффициент настраивается путем программирования микросхемы АЦП [55].

Если ввиду конструкторских ограничений на физические параметры датчика давления его реализация невозможна с найденными значениями коэффициентов q_1 , q_2 , q_3 и q_4 , то действовать необходимо в соответствии с маршрутом синтеза и анализа проектного решения (рисунок 1.4).

2.2.4 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом наименьших квадратов.

В модели применяется алгоритм, основанный на методе наименьших квадратов. Принимают во внимание то, что измеряемая величина распределяется по диапазону измерения с различной вероятностью. Синтез параметров q_1, q_2, \dots, q_n расчетной СХДД выполняется в соответствии с условием минимума математического ожидания квадрата погрешности приближения

$$D_{\Pi}(q_1, q_2, \dots, q_n) = \int_{P_{\text{Н}}}^{P_{\text{В}}} p_p(P) [f_{\text{Р}}(P; q_1, q_2, \dots, q_n) - f_{\text{Ж}}(P)]^2 dx = \min, \quad (2.22)$$

где $p_p(P)$ - функция плотности распределения вероятностей (ФПРВ) измеряемого давления. График функции плотности распределения вероятностей давления, выраженной формулой $p_p(P) = \frac{P}{18}$ на диапазоне измерения от 0 кПа до 6 кПа и $p_p(P) = 0$ во всех других точках, представлен на рисунке 2.7.

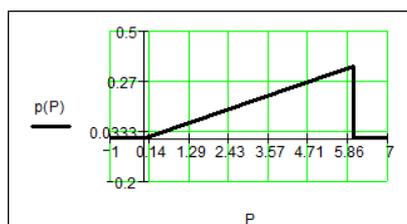


Рисунок 2.7 – График ФПРВ

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).

Совместно с (2.22), параметры КНК рассчитывают с другим условием

$$M_{\Pi}(q_1, q_2, \dots, q_n) = \int_{P_n}^{P_g} p_p(P) [f_p(P; q_1, q_2, \dots, q_n) - f_{\text{Ж}}(P)] dP = 0. \quad (2.23)$$

В данном случае решение будет оптимальным и достигается минимум дисперсии погрешности приближения. Оценку полученной КНК проводят по величине среднеквадратической приведенной погрешности приближения (СППП)

$$\sigma_{\Pi} = \frac{\sqrt{D_{\Pi \min}}}{|y_{ав} - y_{ан}|} \cdot 100\%, \quad (2.24)$$

где $D_{\Pi \min}$ - минимальное значение функции (2.22);

$y_{ан}$, $y_{ав}$ - граничные ординаты желаемой статической характеристики датчика давления $f_{\text{Ж}}(x)$.

Расчет КНК и СППП сводится к поиску минимума функции n переменных q_1, q_2, \dots, q_n (2.22). Известно, что такая задача решается путем определения минимума функции Лагранжа

$$L(q_1, q_2, \dots, q_n; \lambda) = D_{\Pi}(q_1, q_2, \dots, q_n) + \lambda \cdot M_{\Pi}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2.25)$$

где λ - неопределенный постоянный множитель (множитель Лагранжа).
 Параметры КНК q_1, q_2, \dots, q_n , определяется в результате решения системы $n+1$ алгебраических уравнений

$$\frac{\partial L(q_1, q_2, \dots, q_n; \lambda)}{\partial q_i} = 0, \text{ где } i = 1, 2, \dots, n.$$

$$\frac{\partial L(q_1, q_2, \dots, q_n; \lambda)}{\partial \lambda} = 0. \quad (2.26)$$

Выполним синтез параметров q_1, q_2 и q_6 расчетной статической характеристики схемы измерения датчика давления $f_{P_{с.и.}}(\Delta P; q_1, q_2, q_6)$ (2.12) методом наименьших квадратов в MathCAD.

Диапазон измерения установим в пределах от 0 кПа до +6 кПа. Желаемая статическая характеристика схемы измерения датчика давления является

$$f_{\text{ж}}(\Delta P) = \frac{25000}{3} \cdot \Delta P, \quad (2.21)$$

т.к. код АЦП при $\Delta P_{\text{мин}}=0$ кПа должен быть равен 0 единиц, а при $\Delta P_{\text{макс}}=6$ кПа, равен 50000 единиц.

Методом интерполяции находим приближенные значения параметров $q_{1np} = 10^{-7}$, $q_{2np} = 6 \cdot 10^{-3}$ и $q_{6np} = 1.05 \cdot 10^6$, строим схематические графики желаемой статической характеристики (пунктирная прямая) и предполагаемой КНК (сплошная кривая) (рисунок 2.8).

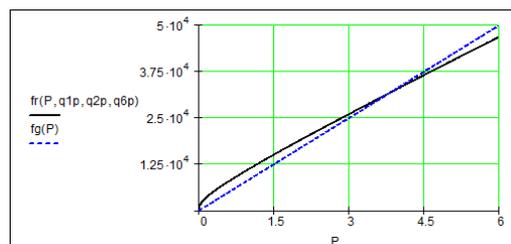


Рисунок 2.8 – График желаемой статической характеристики и предполагаемой КНК

Далее в соответствии с формулами (2.22), (2.23) и используя функцию расчетной статической характеристики схемы измерения датчика (2.12), запишем условия минимума дисперсии погрешности приближения

$$D_{\Pi}(q_1, q_2, q_6) = \int_{P_H}^{P_B} p_p(P) [f_p(P; q_1, q_2, q_6) - f_{\mathcal{J}}(P)]^2 dx = \min$$

$$M_{\Pi}(q_1, q_2, q_6) = \int_{P_H}^{P_B} p_p(P) [f_p(P; q_1, q_2, q_6) - f_{\mathcal{J}}(P)] dP = 0$$

Затем по (2.25) задаем функцию Лагранжа

$$L(q_1, q_2, q_6; \lambda) = D_{\Pi}(q_1, q_2, q_6) + \lambda \cdot M_{\Pi}(q_1, q_2, q_6)$$

Находим уточненные параметры q_1, q_2 и q_6 . Для этого решаем в MathCAD систему уравнений в соответствии с условием минимума функции Лагранжа (2.26). В результате получаем следующие значения искомым параметров $q_1 = 2.578 \cdot 10^{-9}$, $q_2 = 6.97 \cdot 10^{-3}$, $q_6 = 1.113 \cdot 10^6$.

На рисунке 2.9 показаны графики погрешности приближения (2.4) с приближенными значениями параметров q_1, q_2 и q_6 (пунктирная линия) и с уточненными - сплошная линия.

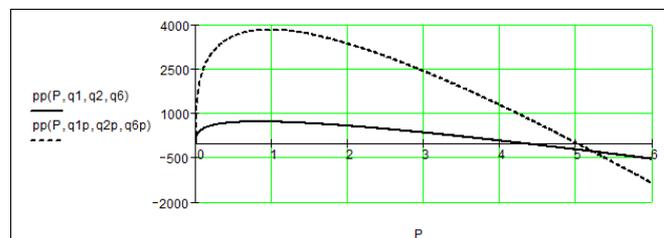


Рисунок 2.9 – Графики погрешности приближения

Минимальное значение математического ожидания квадрата погрешности приближения $D_{\Pi \min} = 2.37 \cdot 10^5$.

Рассчитаем значение среднеквадратической приведенной погрешности приближения по формуле (2.24)

$$\sigma_{II} = \frac{\sqrt{D_{II\min}}}{|y_{ав} - y_{ан}|} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{2.37 \cdot 10^5}}{|50000 - 0|} \cdot 100\% = 0,974\%$$

Строим графики желаемой статической характеристики (пунктирная прямая) и полученной кривой наименьших квадратов (сплошная кривая) (рисунок 2.10).

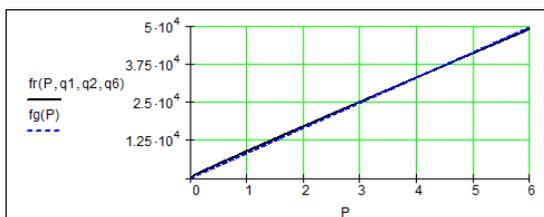


Рисунок 2.10 – График желаемой статической характеристики и полученной КНК

Далее выбираются необходимые значения физических параметров датчика давления, от которых зависят значения найденных коэффициентов q_1 , q_2 и q_6 . Подставляя коэффициент q_1 в формулу (2.6) можно найти радиус мембраны R , толщину мембраны h и выбрать материал мембраны с необходимым модулем упругости E . Например, если материал мембраны - сплав 36НХТЮ, модуль упругости $E = 2,15 \cdot 10^6$ кгс/см² и выбрать её толщину $h = 2$ мм, то радиус мембраны будет равен $R = 2,51$ мм.

Далее выбирая относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика дифференциально - емкостного преобразователя $\epsilon_r = 20$, расстояние между электродами $D_0 = 100$ мкм и ширину обкладок $a = 2,5$ мм по формуле (2.8) получим коэффициент $q_3 = 4.204 \cdot 10^{-7}$.

Исходя из электронной схемы и принципа работы АЦП, описанного в [55], задаем значение резисторов $R_{зар} = 100$ Ом, $R_{разр} = 82$ кОм, $U_{разр} = 0.73$ В, $U_{зар} = 1.33$ В, $U_{num} = 2.3$ В и рассчитываем по формуле (2.10) коэффициент $q_4 = 3.939 \cdot 10^5$.

Так как $q_6 = q_5 \cdot q_4 \cdot q_3$, то коэффициент пропорциональности АЦП $q_5 = 6.721 \cdot 10^6$. Этот коэффициент настраивается путем программирования микросхемы АЦП [55].

Если ввиду конструкторских ограничений на физические параметры датчика давления его реализация невозможна с найденными значениями коэффициентов q_1, q_2, q_3 и q_4 , то действовать надо в соответствии с маршрутом синтеза и анализа проектного решения (рисунок 1.4).

2.3. Автоматизация проектирования динамических характеристик датчика давления.

2.3.1 Структурно - параметрическая модель для синтеза и анализа динамических характеристик датчика давления

Структурная схема модели для динамического режима измерения выделенного класса датчиков давления представлена на рисунке 2.11.

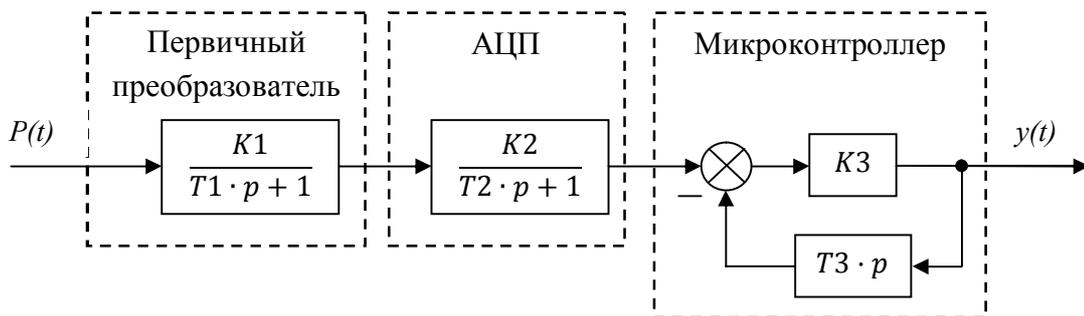


Рисунок 2.11 – Структурная схема модели класса датчиков давления для динамического режима измерения

Передаточная функция первичного преобразователя:

$$W1(p) = \frac{K1}{T1 \cdot p + 1}, \quad (2.22)$$

где $K1$ - коэффициент передачи (пропорциональности) первичного преобразователя; $T1$ - постоянная времени первичного преобразователя [с].

Передаточная функция модуля преобразователя электрических сигналов в цифровой код (АЦП):

$$W2(p) = \frac{K2}{T2 \cdot p + 1}, \quad (2.23)$$

где K_2 - коэффициент пропорциональности модуля АЦП; T_2 - постоянная времени модуля АЦП [с].

В микроконтроллере при цифровой обработке измерительный сигнал принимает необходимое значение выходного кода с помощью коэффициента усиления (пропорциональности) K_3 . Также имеется отрицательная обратная связь, которая воздействует на коды АЦП, выраженная в виде фильтра 1-ого порядка. Передаточная функция цифрового фильтра 1-ого порядка имеет вид:

$$W_3(p) = T_3 \cdot p, \quad (2.24)$$

где T_3 - постоянная времени цифрового фильтра 1-ого порядка [с].

Передаточная функция микроконтроллера равна:

$$W_{\text{микро}}(p) = \frac{K_3}{T_3 \cdot K_3 \cdot p + 1} = \frac{K_3}{T_{\text{микро}} \cdot p + 1}, \quad (2.25)$$

где $T_{\text{микро}}$ - постоянная времени звена микроконтроллера [с].

Тогда, передаточная функция электронных модулей (АЦП и микроконтроллера) датчика давления будет следующей:

$$W_{\text{эл}}(p) = \frac{K_2 \cdot K_3}{(T_2 \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{микро}} \cdot p + 1)} = \frac{K_{\text{эл}}}{T_{\text{эл}}^2 + 2 \cdot T_{\text{эл}} \cdot \xi \cdot p + 1} = \frac{K_{\text{эл}} \cdot \omega_{0 \text{эл}}^2}{p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_{0 \text{эл}} \cdot p + \omega_{0 \text{эл}}^2}, \quad (2.26)$$

где $K_{\text{эл}}$ - коэффициента усиления электронных модулей (АЦП и микроконтроллера), $T_{\text{эл}}$ - постоянная времени электронных модулей (АЦП и микроконтроллера) [с], ξ - безразмерный относительный коэффициент демпфирования, $\omega_{0 \text{эл}} = \frac{1}{T_{\text{эл}}}$ - собственная частота электронных модулей (АЦП и микроконтроллера) [рад/с]. Следовательно, передаточная функция класса датчиков давления равна:

$$W_{\text{дд}}(p) = \frac{K_1 \cdot K_{\text{эл}} \cdot \omega_{0 \text{эл}}^2}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_{0 \text{эл}} \cdot p + \omega_{0 \text{эл}}^2)} = \frac{K \cdot \omega_{0 \text{эл}}^2}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_{\text{эл}}^2 + 2 \cdot T_{\text{эл}} \cdot \xi \cdot p + 1)}, \quad (2.27)$$

где K - коэффициент усиления датчика давления. Передаточную функцию (2.27) можно записать в виде:

$$W_{\text{дд}}(p) = \frac{K}{T^3 \cdot p^3 + a_1 \cdot T^2 \cdot p^2 + a_2 \cdot T \cdot p + 1} \quad (2.28)$$

$$\text{или } W_{\partial\partial}(p) = \frac{K \cdot \omega_0^3}{p^3 + a_1 \cdot \omega_0 \cdot p^2 + a_2 \cdot \omega_0^2 \cdot p + \omega_0^3} \quad (2.29)$$

где T - постоянная времени датчика давления [с], ω_0 - собственная частота датчика давления [рад/с], a_1 , a_2 - безразмерные параметры Вышнеградского. Такая передаточная функция является функцией 3-ого порядка. Дифференциальное уравнение выделенного класса датчиков давления имеет вид:

$$\alpha_3 \ddot{y}(t) + \alpha_2 \dot{y}(t) + \alpha_1 y(t) + \alpha_0 y(t) = \beta_0 x(t), \quad (2.30)$$

где $T = \sqrt[3]{\frac{\alpha_3}{\alpha_0}}$, $a_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_0 T^2}$, $a_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_0 T}$, $\omega_0 = \frac{1}{T}$, $K = \frac{\beta_0}{\alpha_0}$. $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ и β_0 - коэффициенты, зависящие от параметров датчика давления.

Тогда, относительная передаточная функция класса датчиков давления равна:

$$W_{0 \partial\partial}(p) = \frac{1}{T^3 \cdot p^3 + a_1 \cdot T^2 \cdot p^2 + a_2 \cdot T \cdot p + 1} = \frac{\omega_0^3}{p^3 + a_1 \cdot \omega_0 \cdot p^2 + a_2 \cdot \omega_0^2 \cdot p + \omega_0^3}. \quad (2.31)$$

На динамические характеристики влияют три параметра - ω_0 , a_1 и a_2 (или T_1 , $T_{эл}$ и ξ), которые зависят только от параметров датчика давления. При заданных значениях T_1 , $T_{эл}$ и ξ значения ω_0 , a_1 и a_2 вычисляются по формулам [51]:

$$a_1 = \frac{1+2 \cdot \xi \cdot Q}{\sqrt[3]{Q^2}}, \quad a_2 = \frac{Q+2 \cdot \xi}{\sqrt[3]{Q}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{T_{эл} \cdot \sqrt[3]{Q}} \quad (2.32)$$

где $Q = T_1 / T_{эл}$ - относительная постоянная времени. При заданных значениях ω_0 , a_1 и a_2 значения T_1 , $T_{эл}$ и ξ вычисляются по формулам [51]:

$$T_1 = Q \cdot T_{эл}, \quad T_{эл} = \frac{1}{\sqrt[3]{Q} \cdot \omega_0}, \quad \xi = \frac{a_1 \cdot \sqrt[3]{Q^2} - 1}{2 \cdot Q}, \quad (2.33)$$

где $Q = \sqrt{q^3}$, $q = Q^3$ - положительный вещественный корень кубического уравнения

$$q^3 - a_2 \cdot q^2 + a_1 \cdot q - 1 = 0. \quad (2.34)$$

При проектировании датчиков давления необходимо решить задачи синтеза – определить такие значения параметров ω_0 , $a1$ и $a2$ или $T1$, $T_{эл}$ и ξ передаточной функции $W_{\partial\partial}(p)$, при которых датчик давления имеет желаемые динамические характеристики. При постановке задачи оптимизации параметров ω_0 , $a1$ и $a2$ или $T1$, $T_{эл}$ и ξ используют критерии минимальной длительности переходного процесса (ДПП) t_n , при ограничении относительной переходной погрешности Δ , максимальной ширины полосы пропускания частот (ППЧ) ω_n , при ограничении относительной частотной погрешности ε и др. Задача анализа - определить динамические характеристики датчика давления от параметров ω_0 , $a1$ и $a2$ или $T1$, $T_{эл}$ и ξ его передаточной функции $W_{\partial\partial}(p)$.

2.3.2 Анализ переходной функции класса датчиков давления

Переходная функция датчика давления, у которого коэффициент усиления $K \neq 0$, равна

$$h(t) = K \cdot h_0(t), \quad (2.35)$$

где, $h_0(t)$ - относительная (нормированная) переходная функция

Относительная переходная функция для выделенного класса датчиков давления выражается формулой

$$h_0(t) = L^{-1} \{ 1 / [p(T1p+1)(T_{эл}^2 p^2 + 2\xi T_{эл} p + 1)] \}. \quad (2.36)$$

На рисунке 2.12 показаны переходные характеристики для выделенного класса датчиков давления, с рассчитанной выше передаточной функцией $W_{\partial\partial}(p)$.

Форма графика переходной функции зависит от параметров Вышнеградского $a1$, $a2$. При изменении собственной частоты ω_0 датчика давления графики, не изменяя своей формы, сжимаются или растягиваются по оси абсцисс. В зависимости от формы этого графика переходной процесс для выделенного класса датчиков

давления может быть: идеальный (1); монотонный (2); колебательный (3); монотонно - периодический (4).

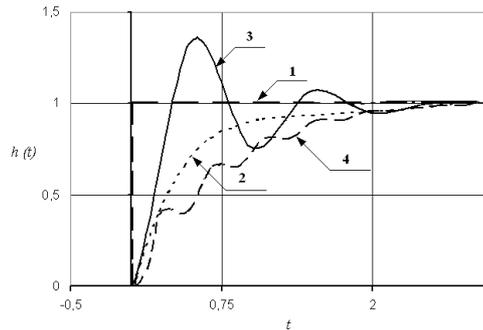


Рисунок 2.12 – Виды переходной характеристики $h(t)$ для выделенного класса датчиков давления

Для поиска выходного $y(t)$ сигнала датчика давления с помощью переходной функции используют формулу

$$y(t) = h(t)x(0) + \int_0^t h(t-\tau) \cdot \dot{P}(\tau) d\tau, \quad (2.37)$$

где $P(t)$ – входное воздействие.

Во всех датчиках давления имеется относительная переходная погрешность (см. рисунок 2.12)

$$\Delta_{nn}(t) = 1(t) - h_0(t). \quad (2.38)$$

Время t_{Π} , по истечении которого переходная погрешность становится (и остается далее) меньше допустимого значения относительной переходной погрешности Δ , называется длительностью переходного процесса (ДПП) [51]. ДПП для выделенного класса датчиков давления вычисляется по формуле

$$t_{\Pi} = \frac{\tau_{\Pi}(a1, a2, \Delta)}{\omega_0} = T \cdot \tau_{\Pi}(a1, a2, \Delta), \quad (2.39)$$

где $\tau_{\Pi}(a1, a2, \Delta)$ - безразмерная относительная длительность переходного процесса, зависящая от трех переменных - параметров Вышнеградского $a1, a2$ и величины допустимой относительной переходной погрешности Δ . Длительность переходного процесса можно определить из графика относительной переходной функции (рисунок 2.13).

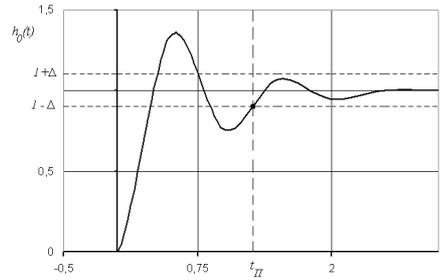


Рисунок 2.13 – Длительность переходного процесса t_{Π} для выделенного класса датчиков давления

Время t_{Π} определяется как абсцисса точки попадания графика относительной переходной функции $h_0(t)$ (2.39) в трубку точности $1 \pm \Delta$. В изученной литературе [6, 51, 56, 57] установлено, что для выделенного класса датчиков давления с передаточной функцией $W_{\partial\partial}(p)$ (2.27) имеются оптимальные значения параметров Вышнеградского $a1_{opt}$ и $a2_{opt}$, при которых относительная длительность переходного процесса τ_{Π} минимальна.

2.3.3 Анализ частотных динамических характеристик класса датчиков давления.

Для выбранного класса датчиков давления с полученной передаточной функцией $W_{\partial\partial}(p)$ (2.27) относительная амплитудно частотная функция выражается формулой

$$A_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(T_1^2 \omega^2 + 1)[(1 - T_{эл}^2 \omega^2)^2 + 4\xi^2 T_{эл}^2 \omega^2]}}, \quad (2.40)$$

или

$$A_0(\gamma) = \frac{1}{\sqrt{(1 - a1\gamma^2)^2 + (a2 - \gamma^2)^2 \gamma^2}}, \quad (2.41)$$

где $\gamma = \omega/\omega_0$ - относительная частота входного гармонического сигнала.

График этой функции называется относительной амплитудно - частотной характеристикой (АЧХ). Форма АЧХ зависит только от параметров Вышнеградского $a1, a2$. На рисунке 2.14 показаны формы этого графика для выбранного класса датчиков давления.

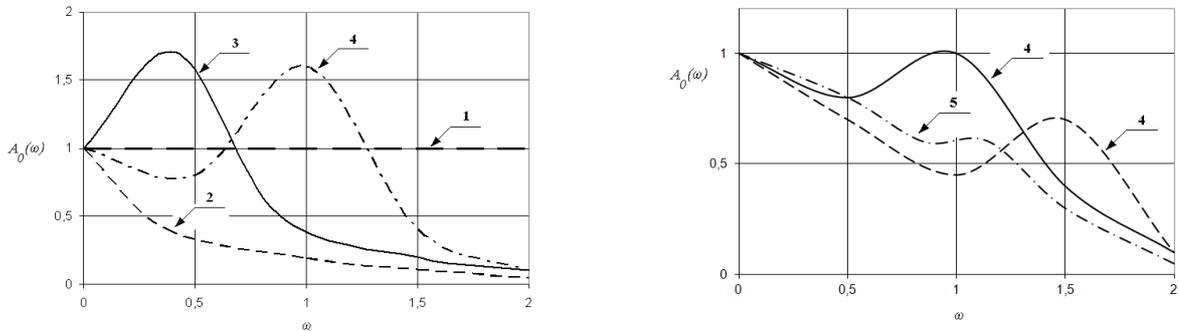


Рисунок 2.14 – Относительные АЧХ выбранного класса датчиков давления

В зависимости от формы этого графика различают следующие основные типы АЧХ для выбранного класса датчиков давлений: 1) идеальная; 2) пологая (монотонная); 3) резонансная (одногорбая); 4) двугорбая; 5) стулообразная.

У всех ДД имеется относительная частотная погрешность

$$\Delta_{\varepsilon}(\omega) = 1 - A_0(\omega). \quad (2.42)$$

Ширина ППЧ для выделенного класса датчиков давления вычисляется по формуле

$$\omega_{\Pi} = \frac{1}{T3} \cdot \gamma_{\Pi}(a1, a2, \varepsilon) = \omega_0 \cdot \gamma_{\Pi}(a1, a2, \varepsilon), \quad (2.43)$$

где $\gamma_{\Pi}(a1, a2, \varepsilon)$ относительная безразмерная ширина ППЧ.

Ширина полосы пропускания частот ω_{Π} является абсциссой точки первого выхода графика относительной АЧХ датчика давления за границы «трубки точности» $1 \pm \varepsilon$ (рисунок 2.15).

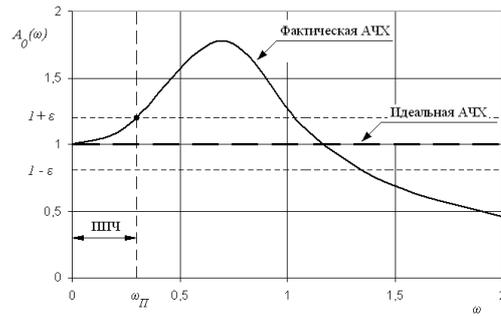


Рисунок 2.15 ППЧ $\omega_{П}$ для выделенного класса датчиков давления

В литературе [6, 51, 56, 57] установлено, что для выделенного класса датчиков давления с передаточной функцией $W_{\partial\partial}(p)$ (2.27) имеются оптимальные значения параметров Вышнеградского $a1_{opt}$ и $a2_{opt}$, при которых ширина полосы пропускания частот $\omega_{П}$ максимальна.

2.3.4 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров передаточной функции класса датчиков давления по критерию минимальной длительности переходного процесса

При проектировании выделенного класса ДД одной из основных задач является достижение минимальной ДПП $t_{П}$. Необходимо выполнить процедуру синтеза тех параметров датчика давления, от которых зависит $t_{П}$. Автоматизированный расчет значения ДПП, соответствующего заданному сочетанию параметров q_1, q_2, \dots, q_n , выполнен в MATLAB и MATHCAD с использованием алгоритма представленного на рисунке Б.2 приложения Б. Модель для выделенного класса датчиков давления с передаточной функцией $W_{\partial\partial}(p)$ (2.27) позволяет выполнить автоматизированный синтез параметров Вышнеградского $a1$, $a2$ (или параметров ξ и Q), и ω_0 таким образом, чтобы он обладал минимальной длительностью переходного процесса при заданной ширине полосы пропускания частот $\omega_{ПВ}$. Блок-схема решения указанной задачи представлена на рисунке 2.16.

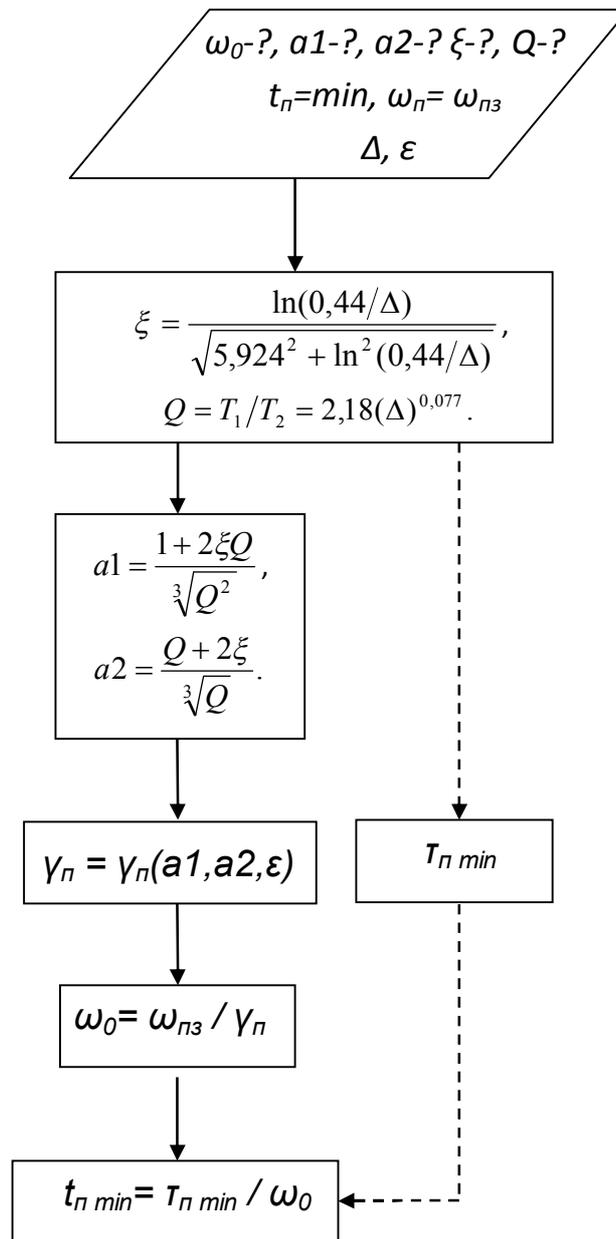


Рисунок 2.16 – Схема алгоритма расчета минимальной длительности переходного процесса $t_{П\ min}$ при заданной полосе пропускания частот $\omega_{ПЗ}$

С учетом формул (2.32) и считая, что $\omega_0 = 1$, относительную передаточную функцию датчика давления (2.36) можно представить в виде

$$h_0(t) = L^{-1} \{ 1/[p \cdot (\sqrt[3]{Q^2} p + 1) \cdot \left(\left(\frac{1}{\sqrt[3]{Q}} \right)^2 p^2 + 2\xi \frac{1}{\sqrt[3]{Q}} p + 1) \right] \} \quad (2.44)$$

Зададимся допустимой переходной погрешностью $\Delta=2\%$. Далее при процедуре синтеза параметров передаточной функции датчика давления

необходимо провести исследование функции $\tau_{II}(a1, a2, \Delta)$. Учитывая формулы (2.33), эту функцию можно записать в виде

$$\tau_{II} = \tau_{II}(Q, \xi, \Delta) \quad (2.45)$$

Решая поставленную задачу в САПР MATHCAD, определим функцию $\tau_{II}(Q, \xi, \Delta)$ как время, по истечению которого переходный процесс попадет в трубку точности $I \pm \Delta$. Для этого воспользуемся алгоритмом, представленном на рисунке Б.2 приложения Б. Тогда безразмерная относительная длительность переходного процесса будет выглядеть следующим образом

$$\tau_{II}(Q, \xi, \Delta) := \begin{cases} k \leftarrow 0 \\ \tau_0 \leftarrow \tau_V \\ \text{while } |1 - h_0(\tau_k, Q, \xi)| \leq \Delta \\ \quad k \leftarrow k + 1 \\ \quad \tau_k \leftarrow \tau_V - \frac{\tau_V}{NT} \cdot k \end{cases}$$

Проведем исследование этой функции в области $0.5 < Q < 3.5$ и $0 < \xi < 3$. На рисунке 2.17 представлена полученная поверхность. На графике функции $\tau_{II}(Q, \xi, \Delta)$ видно наличие минимума при определенных параметрах Q, ξ .

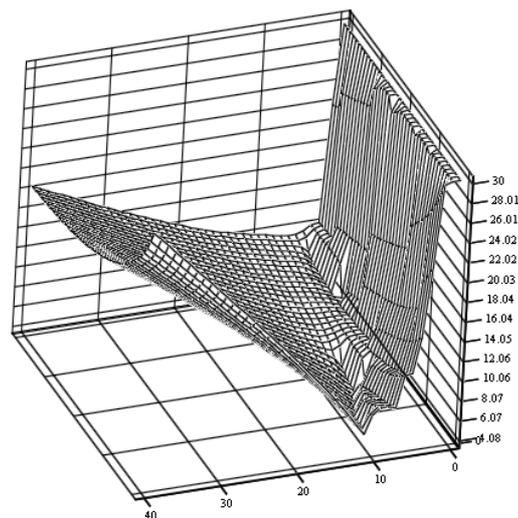


Рисунок 2.17 – Поверхность функции $\tau_{II}(Q, \xi, \Delta)$

В соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке 2.13, оптимальные параметр ξ и Q рассчитываются по формулам [51]

$$\xi = \frac{\ln(0,44/\Delta)}{\sqrt{5,924^2 + \ln^2(0,44/\Delta)}} \quad (2.46)$$

$$Q = T_1/T_2 = 2,18(\Delta)^{0,077} \quad (2.47)$$

Подставляя в формулы (2.46) и (2.47) заданное значение допустимой переходной погрешностью $\Delta=2\%$, получим $Q_{opt} = 1.613$ и $\xi_{opt} = 0.463$. Подставляя полученные значения параметров ξ_{opt} и Q_{opt} в формулы (2.32) и (2.33), получим параметры Вышнеградского $a1_{opt} = 1.812$ и $a2_{opt} = 2.164$, и параметры $T1_{opt} = 1.375$ и $T_{эл\ opt} = 0.853$. Найдем минимальную относительную длительность переходного процесса, подставив в функцию $\tau_{II}(Q, \xi, \Delta)$ найденные оптимальные параметры Q_{opt} и ξ_{opt} . Тогда $\tau_{II\ min}(1.613, 0.463, \Delta) = 3.84$. Строим график относительной переходной функции (2.36) с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием минимума длительности переходного процесса (рисунок 2.18).



Рисунок 2.18 – График относительной переходной функции с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием минимума

ДПП

Отличительной особенностью графика $h_0(t)$, изображенного на рисунке 2.15, является то, что своим первым и вторым экстремумами, он касается соответственно нижней и верхней границ трубки точности $1 \pm \Delta$. В этом случае значение длительности переходного процесса t_{II} оказывается минимальным ($t_{II} = t_{II\ min}$). Зададимся допустимой частотной погрешностью $\varepsilon=10\%$ и вычислим относительную ширину полосы пропускания частот $\gamma_{п.}$ Для этого

построим график относительной амплитудно-частотной характеристики, выраженный формулой(2.40) (рисунок 2.19).

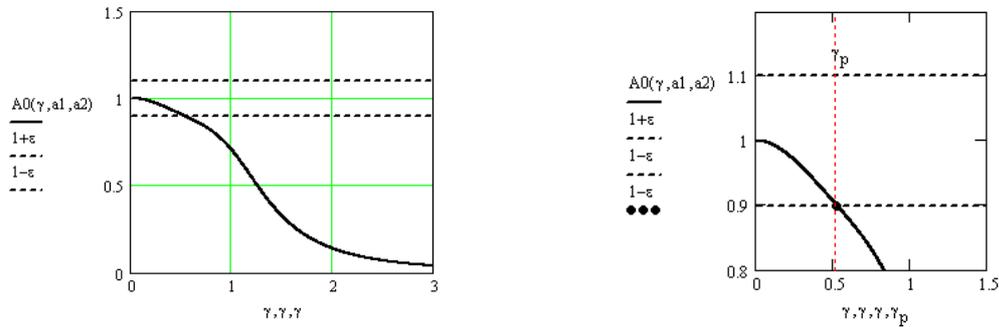


Рисунок 2.19 – График относительной АЧХ с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием минимума ДПП

Решая задачу в САПР MathCAD относительно ширину полосы пропускания частот γ_{Π} найдем с помощью функции root.

$$\gamma_r := 1 \quad \gamma_p := \text{root}(A0(\gamma_r, a1, a2) - 1 + \varepsilon, \gamma_r) \quad \gamma_p = 0.526$$

где γ_r – приближенное значение, необходимое для расчета, $\gamma_p = \gamma_{\Pi} = 0.526$ – рассчитанная относительную ширину полосы пропускания частот.

Зададимся требуемой шириной полосы пропускания частот $\omega_{n3} = 5$ и вычислим собственную частоту датчика давления ω_0 , обеспечивающая заданное значение ширины полосы пропускания частот, по формуле $\omega_0 = \omega_{n3} / \gamma_n = 5 / 0.526 = 9.5$ [рад/с]. Рассчитаем длительность переходного процесса датчика давления t_{Π} по формуле $t_{\Pi \text{ мин}} = \tau_{n \text{ мин}} / \omega_0 = 3.84 / 9.5 = 0,404$ [с].

Тогда передаточная функция датчика давления, записанная по формуле (2.29), при $K=1$, будет иметь вид

$$W_{\partial\partial}(p) = \frac{9.5^3}{p^3 + 1.812 \cdot 9.5 \cdot p^2 + 2.164 \cdot 9.5^2 \cdot p + 9.5^3}$$

Построим график АЧХ, выраженной формулой $A(\omega) = |W_{\partial\partial}(i\omega)|$ (рисунок 2.20).

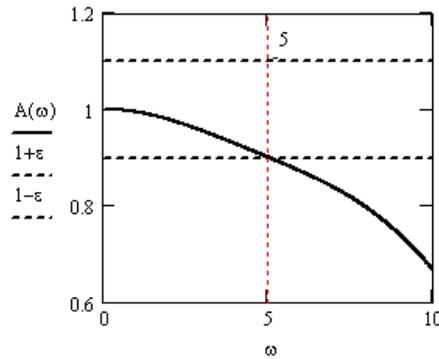


Рисунок 2.20 – График АЧХ с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием минимума ДПП и заданной шириной ППЧ

На графике (рисунок 2.20) видно, что полоса пропускания частот равна заданной полосе пропускания частот $\omega_{пз}$.

2.3.5 Разработка расчетной модели для автоматизации синтеза параметров передаточной функции класса датчиков давления по критерию максимальной ширины полосы пропускания частот

При проектировании датчиков давления часто стоит задача получить максимальную ширину ППЧ $\omega_{П}$. Для этого необходимо выполнить процедуру синтеза тех параметров датчика давления, от которых зависит $\omega_{П}$. Расчет значения ППЧ, соответствующего заданному сочетанию параметров q_1, q_2, \dots, q_n , можно выполнять в САПР MATLAB или MATHCAD с использованием алгоритма представленного на рисунке Б.3 приложения Б.

Модель для выделенного класса датчиков давления с передаточной функцией $W_{\partial\partial}(p)$ (2.27) позволяет выполнить автоматизированный синтез параметров Вышнеградского a_1, a_2 (или параметров ξ и Q), и ω_0 таким образом, чтобы он обладал максимальной шириной ППЧ при заданной ДПП $t_{ПЗ}$.

С учетом формул (2.32), (2.33) и считая, что $\omega_0 = 1$, относительную АЧХ датчика давления (2.40) можно представить в виде

$$A_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(\left(\frac{2}{Q^3}\right)^2 \omega^2 + 1\right) \left[\left(1 - \left(\frac{1}{\sqrt[3]{Q}}\right)^2 \omega^2\right)^2 + 4\xi^2 \left(\frac{1}{\sqrt[3]{Q}}\right)^2 \omega^2\right]}} \quad (2.48)$$

Блок - схема решения указанной задачи представлена на рисунке 2.21.

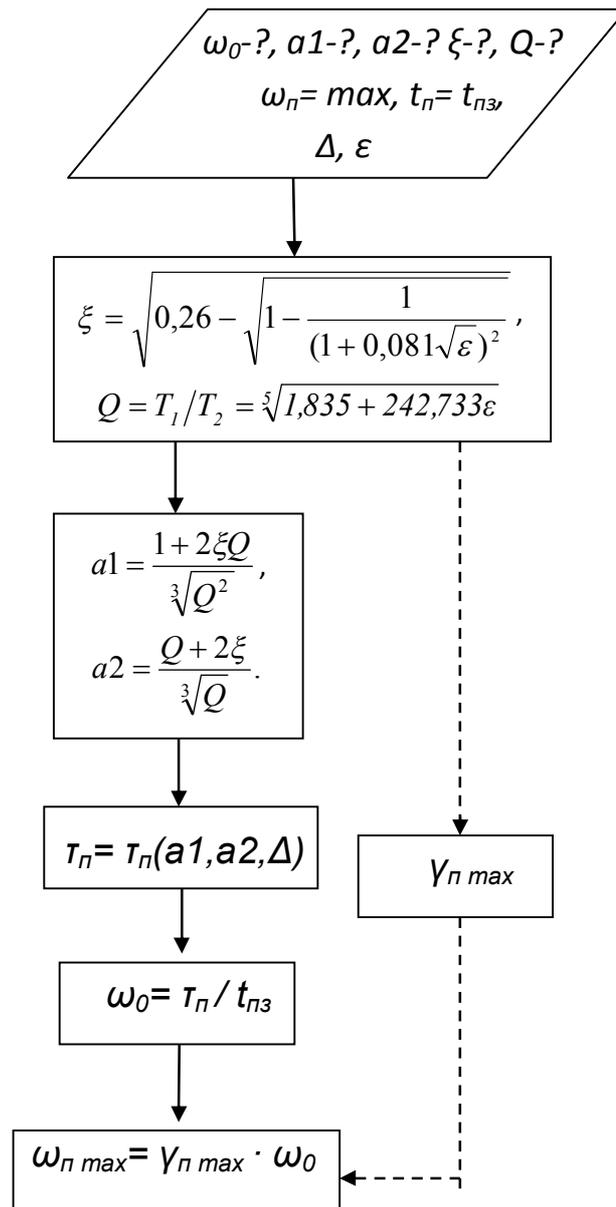


Рисунок 2.21 – Схема алгоритма расчета максимальной ППЧ $\omega_{\Pi \max}$ при заданной ДПП t_{Π}

Зададимся допустимой частотной погрешностью $\varepsilon=3\%$. Далее при процедуре синтеза параметров передаточной функции датчика давления (2.27)

необходимо провести исследование функции $\gamma_{II}(a1, a2, \varepsilon)$. Учитывая формулы (2.32), эту функцию можно записать в виде

$$\gamma_{II} = \gamma_{II}(Q, \xi, \Delta) \quad (2.49)$$

Решая поставленную задачу в САПР MATHCAD, определим относительную ширину ППЧ как абсциссу $\gamma_{II} = \gamma_{II}(Q, \xi, \Delta)$ точки первого выхода графика относительной АЧХ из трубки точности $1 \pm \varepsilon$. Для этого воспользуемся алгоритмом, представленном на рисунке Б.3 приложения Б. Тогда безразмерная относительная длительность переходного процесса будет выглядеть следующим образом

$$\text{пр}(Q, \xi, \varepsilon) := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \gamma_0 \leftarrow 0 \\ \text{while } |1 - A_0(\gamma_s, Q, \xi)| \leq \varepsilon \\ \quad \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + 1 \\ \gamma_s \leftarrow \frac{\gamma_{s-1}}{I} \cdot s \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Проведем исследование этой функции в области $0.1 < Q < 2.1$ и $0 < \xi < 1$. На рисунке 2.22 представлена полученная поверхность.

На графике функции $\gamma_{II}(Q, \xi, \Delta)$ видно наличие максимума при определенных параметрах Q, ξ .

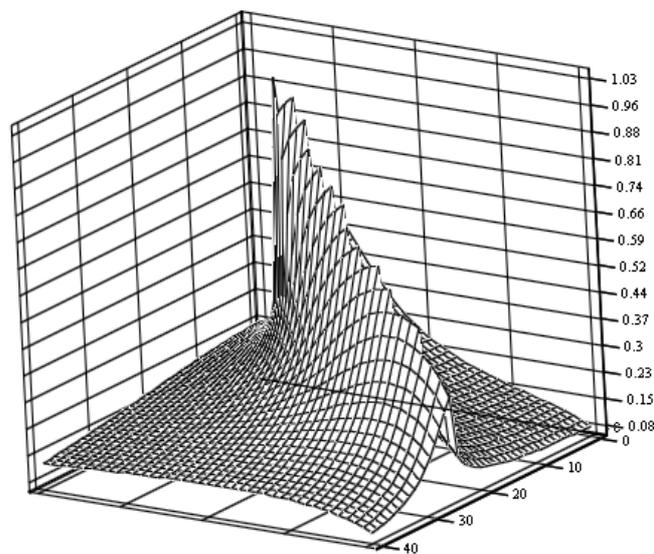


Рисунок 2.22 – Поверхность функции $\gamma_{II}(Q, \xi, \Delta)$

В соответствии с алгоритмом, представленном на рисунке Б.3 в приложении Б, оптимальные параметр ξ и Q рассчитываются по формулам [51]

$$\xi = \sqrt{0,26 - \sqrt{1 - \frac{1}{(1 + 0,081\sqrt{\varepsilon})^2}}} \quad (2.50)$$

$$Q = T_1/T_2 = \sqrt[5]{1,835 + 242,733\varepsilon} \quad (2.51)$$

Подставляя в формулы (2.50) и (2.51) заданное значение допустимой частотной погрешностью $\varepsilon=3\%$, получим $Q_{opt} = 1.556$ и $\xi_{opt} = 0.307$. Подставляя полученные значения параметров ξ_{opt} и Q_{opt} в формулы (2.32) и (2.33), получим параметры Вышнеградского $a1_{opt} = 1.456$ и $a2_{opt} = 1.873$, и параметры $T1_{opt} = 1.343$ и $T_{эл\ opt} = 0.863$. Найдем максимальную относительную ширину полосы пропускания частот, подставив в функцию $\gamma_{\Pi}(Q, \xi, \Delta)$ найденные оптимальные параметры Q_{opt} и ξ_{opt} . Тогда $\gamma_{\Pi\max}(1.556, 0.307, \varepsilon) = 1.076$. График относительной АЧХ (2.48) с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием максимума ширины ППЧ (рисунок 2.23).

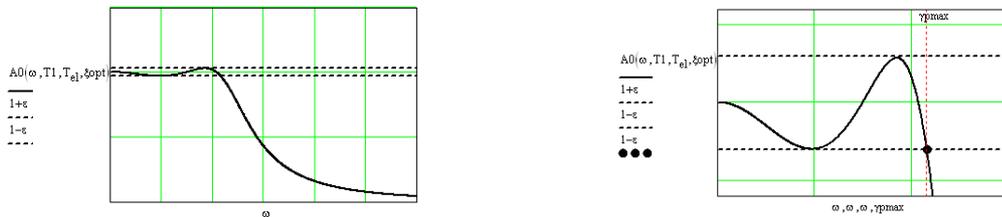


Рисунок 2.23 – График относительной АЧХ с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием максимума ширины ППЧ

Отличительной особенностью графика $A_0(\omega)$, изображенного на рисунке 2.20, является то, что своим первым и вторым экстремумами, он касается соответственно нижней и верхней границ трубки точности $1 \pm \varepsilon$. В этом случае значение ширины полосы пропускания частот ω_{Π} оказывается максимальным ($\omega_{\Pi} = \omega_{\Pi\max}$).

Зададимся допустимой переходной погрешностью $\Delta=5\%$ и вычислим относительную длительность переходного процесса τ_{Π} . Для этого построим график относительной переходной функции $h_0(t)$, выраженный формулой(2.36) (рисунок 2.21). Решая задачу в САПР MathCAD относительную длительность переходного процесса τ_{Π} найдем с помощью функции root.

$$\tau_r := 8 \quad \tau_p := \text{root}(h_0(\tau_r, T_1, T_{e1}, \xi_{opt}) - 1 + \Delta, \tau_r) \quad \tau_p = 7.385$$

где τ_r – приближенное значение, необходимое для расчета, $\tau_p = \tau_{\Pi}=7.385$ – рассчитанная относительная длительность переходного процесса.

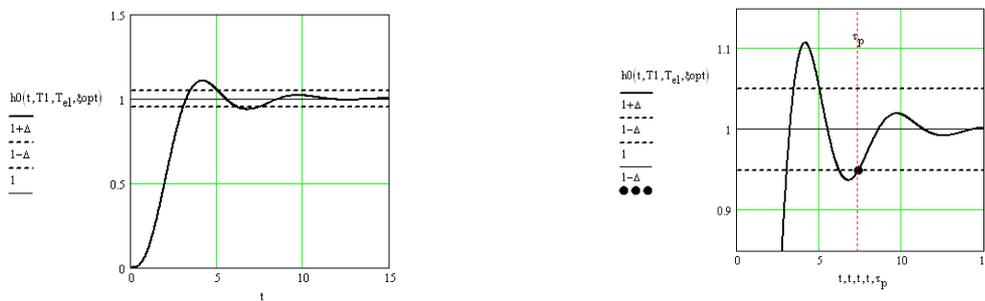


Рисунок 2.24 – График относительной переходной функции с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием максимума ширины ППЧ

Решая задачу в САПР MathCAD относительную длительность переходного процесса τ_{Π} найдем с помощью функции root.

$$\tau_r := 8 \quad \tau_p := \text{root}(h_0(\tau_r, T_1, T_{e1}, \xi_{opt}) - 1 + \Delta, \tau_r) \quad \tau_p = 7.385$$

где τ_r – приближенное значение, необходимое для расчета, $\tau_p = \tau_{\Pi}=7.385$ – рассчитанная относительная длительность переходного процесса.

Зададимся требуемой длительностью переходного процесса $t_{nz} = 0,5$ [с] и вычислим собственную частоту датчика давления ω_0 , обеспечивающую заданное значение длительностью переходного процесса, по формуле

$\omega_0 = \tau_n / t_{nz} = 7,385/0.5 = 14.769$ [рад/с]. Рассчитаем ширину полосы пропускания частот датчика давления ω_{Π} по формуле $\omega_{\Pi \max} = \gamma_{n \max} \cdot \omega_0 =$

$1.076 \cdot 14.769 = 15,89$ [рад/с]. Тогда передаточная функция датчика давления, записанная по формуле (2.27), при $K=1$, будет иметь вид

$$W_{\text{од}}(p) = \frac{14.769^3}{p^3 + 1.456 \cdot 14.769 \cdot p^2 + 1.879 \cdot 14.769^2 \cdot p + 14.769^3}$$

Построим график переходной функции, выраженной формулой (2.15), (рисунок 2.25).

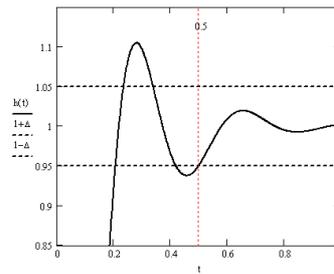


Рисунок 2.25 – График переходной функции с параметрами, оптимизированными в соответствии с критерием максимума ширины ППЧ и заданной ДПП

На графике (рисунок 2.25) видно, что длительность переходного процесса равна заданной длительности переходного процесса $t_{пз}$.

2.4 Выводы к главе

В данной главе разработаны структурно – параметрические модели для синтеза и анализа статических и динамических характеристик класса датчиков давления. Представлены основные методы расчета статической характеристики. Выполнен анализ динамических характеристик класса датчиков давления. Представлены алгоритмы расчета параметров передаточной функции класса датчиков давления. Показано, что переходная характеристика для выбранного класса датчиков давления может быть четырех видов, а АЧХ - пяти видов.

1. Разработана структурно – параметрическая модель для синтеза и анализа статической характеристики класса датчиков давления.

2. Разработаны расчетные модели для автоматизации синтеза параметров статической характеристики датчика давления методом интерполяции, методом наименьших модулей и методом наименьших квадратов. Критериями выбора проектных решений являются минимум максимальной приведенной погрешности приближения или минимум среднеквадратической приведенной погрешности приближения.

3. Разработана структурно – параметрическая модель для синтеза и анализа динамических характеристик класса датчиков давления. Получена передаточная функция датчика давления.

4. Разработаны расчетные модели для автоматизации синтеза параметров передаточной функции датчика давления в соответствии с критериями минимума длительности переходного процесса и максимума ширины полосы пропускания частот.

5. Получены оптимальные физические параметры конструкции и схемной реализации, а также передаточной функции датчика давления для различных критериев выбора проектного решения.

Глава 3. Разработка системных и расчетных моделей для синтеза и анализа проектных решений датчика давления

3.1. Разработка системной модели для синтеза и анализа статических и динамических характеристик дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления

При исследовании первичного преобразователя давления необходимо получить его статическую характеристику, определить, как изменяется статическая характеристика при изменении температуры окружающей среды и при воздействии статического давления. На сегодняшний день разработка системной модели проектного решения наилучшим образом осуществляется в среде MATLAB, используя главное расширение Simulink. Как было сказано в первой главе, при проектировании датчика давления будет использован дифференциально - емкостной первичный преобразователь (емкостная ячейка), поэтому необходимо разработать именно его системную модель. В качестве аналога выбрана емкостная ячейка 315M-DP

Основу системной модели составляет описание особенностей и свойств преобразователя средствами MATLAB и Simulink [14, 18, 36]. В соответствии с системным подходом разделяем модель на подсистемы, каждая из которых выполняет отдельную функцию. Далее подсистемы описываются физическими законами и соотношениями, затем осуществляются связи всех подсистем. На рисунке 3.1 представлена структурная схема модели емкостной ячейки.

Емкостная ячейка имеет два измерительных канала, поэтому необходимо задать оба давления и вычислить их разность ΔP . Зависимость перемещения Ψ измерительной мембраны от входного давления ΔP определяется выражением (2.5).

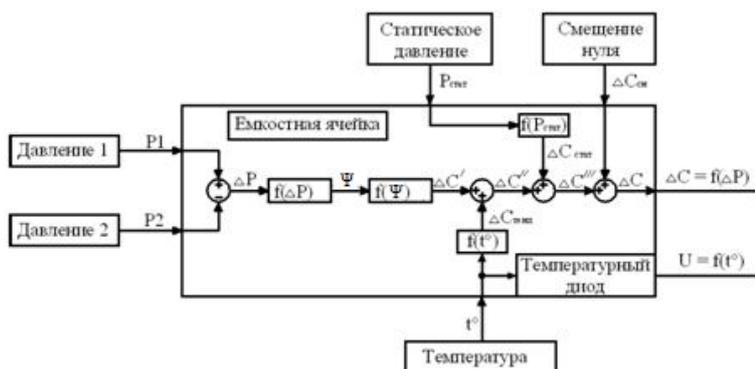


Рисунок 3.1 – Структурная схема модели емкостной ячейки

В модели реализована подсистема задания давления, показанная на рисунке 3.2.

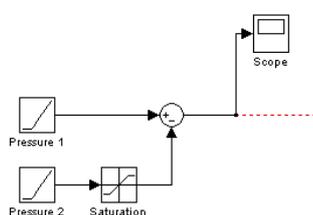


Рисунок 3.2 – Подсистема задания давления

Подсистема задания давления позволяет оценить статическую характеристику емкостной ячейки в диапазоне давлений от -6 до 6 единиц давления (кПа, МПа и т.д.). В документации на емкостную ячейку 315M-DP [44] сказано, что эта модель рассчитана на диапазоны измерения (ranges): 0 - 1,5 кПа, ..., 0-6,89 МПа.

На рисунке 3.3 представлены подсистема задания функции $\Psi = f(\Delta P)$ и её содержание.

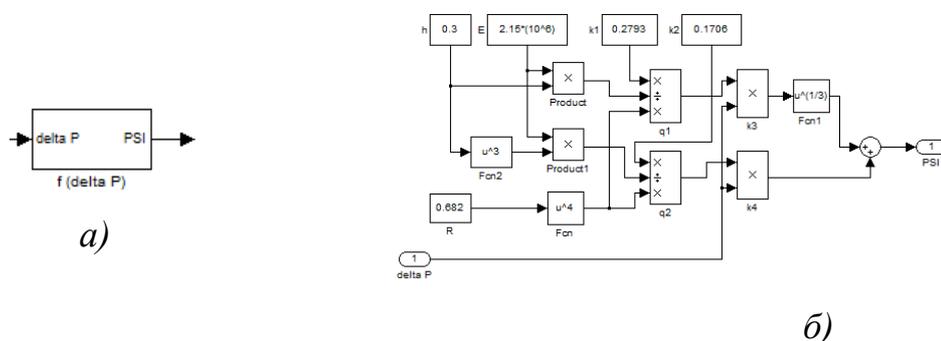


Рисунок 3.3 – Подсистема задания функции $f(\Delta P)$ (а), содержание подсистемы (б).

Подсистема задания функции $f(\Delta P)$ позволяет выполнить синтез таких физических параметров измерительной мембраны как R – радиус, h – толщину, E – модуль упругости материала.

Зависимость изменения емкости $\Delta C' = f(\Psi)$ от перемещения мембраны Ψ выражается зависимостью (2.7). На рисунке 3.4 представлены подсистема задания функции $f(\Psi)$ и её содержание.

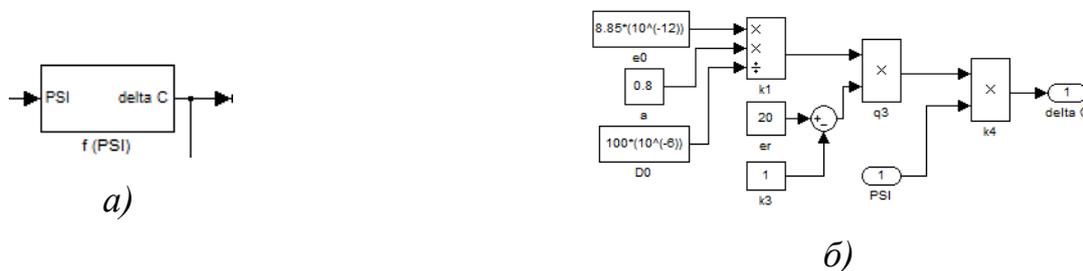


Рисунок 3.4 – Подсистема задания функции $f(\Psi)$ (а), содержание подсистемы (б)

Подсистема задания функции $f(\Psi)$ позволяет выполнить синтез таких физических параметров первичного преобразователя как ϵ_r - относительная диэлектрическая проницаемость, D_0 - расстояние между электродами (обкладками конденсатора), a – ширина обкладок.

Для того чтобы определить, как изменяется статическая характеристика при воздействии такого внешнего фактора как температура окружающей среды в модель была добавлена функция $f(t^\circ)$. Эта функция характеризует дополнительную температурную погрешность $\Delta C_{\text{ТЕМП}}$ выходного сигнала. По данным производителя емкостной ячейки 315М-ДР дополнительная температурная погрешность не превышает 0,009% верхнего предела диапазона измерения (ВПИ)/ $^\circ\text{C}$.

$$\Delta C_{\text{ТЕМП}} = f(t^\circ) = \pm \left(\frac{0,009}{100} \right) \cdot \text{ВПИ} \cdot t^\circ, \quad (3.1)$$

где ВПИ (full scale (fs)) – верхний предел измерения, t° – температура окружающей среды. При $\Delta P > 0$ в функцию $f(t^\circ)$ следует подставить знак «плюс», а при $\Delta P < 0$ – знак «минус». Данная подсистема не реализуется стандартными математическими функциями из библиотеки Simulink. Была разработана оригинальная подсистема с помощью программирования, используя библиотечные блоки выбора действия «If Block». На рисунке 3.5 представлена подсистема задания функции $f(t^\circ)$ и его содержание.

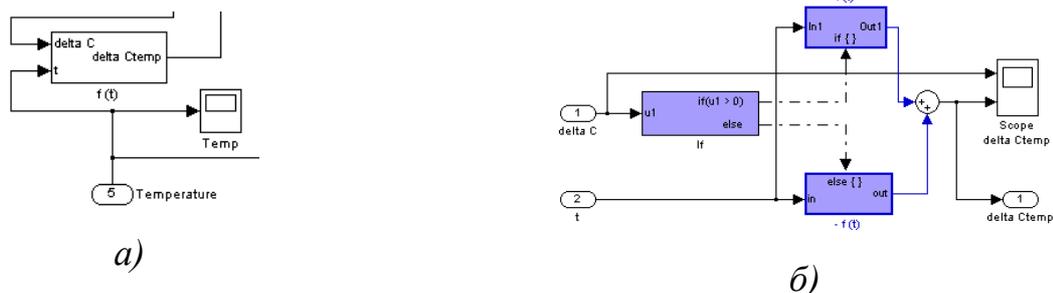


Рисунок 3.5 – Подсистема задания функции $f(t^\circ)$ (а), содержание подсистемы (б)

На осциллографе «Temp» можно наблюдать заданную пользователем температуру. Функция $f(t^\circ)$ реализована в блоках действия при выполнении заданного условия (рисунок 3.6).

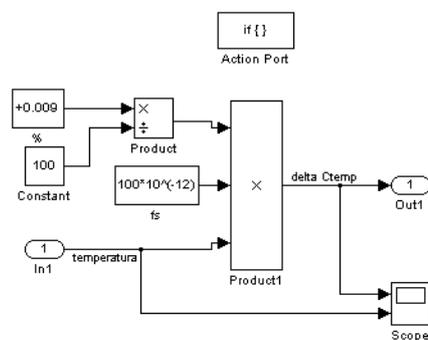


Рисунок 3.6 – Реализация функции $f(t^\circ)$

Для наблюдения за дополнительной температурной погрешностью $\Delta C_{\text{темп}}$ выходного сигнала в модели предусмотрен осциллограф «Scope delta Ctemp» (рисунок 3.7).

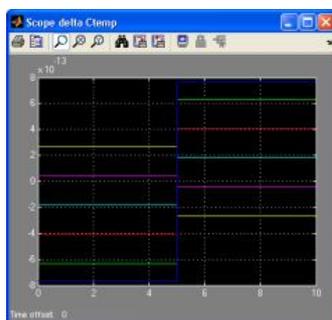


Рисунок 3.7 – Дополнительная температурная погрешность $\Delta C_{\text{темп}}$

В таблице 3.1 представлена дополнительная температурная погрешность, полученная в результате моделирования.

Таблица 3.1 – Дополнительная температурная погрешность, полученная в результате моделирования.

Температура, °С	Абсолютная температурная погрешность, пФ	Относительная температурная погрешность, % ВПИ
-65	-0,585	0,661
-30	-0,27	0,305
-5	-0,045	0,0526
20	0,18	0,21
45	0,405	0,473
70	0,63	0,737
85	0,765	0,895

Влияние статического давления на выходной сигнал емкостной ячейки определяется функцией $f(P_{\text{стат}})$. По данным производителя емкостной ячейки 315M-DP дополнительная погрешность от воздействия статического давления равна $\pm 0,25\% \text{ВПИ}/10 \text{МПа}$ [44].

$$\Delta C_{\text{СТАТ}} = f(P_{\text{СТАТ}}) = \pm \left(\frac{0,025}{100} \right) \cdot \text{ВПИ} \cdot P_{\text{СТАТ}}, \quad (3.2)$$

где $P_{\text{стат}}$ – статическое давление.

На рисунке 3.8 представлена подсистема задания функции $f(P_{\text{стат}})$ и её содержание.

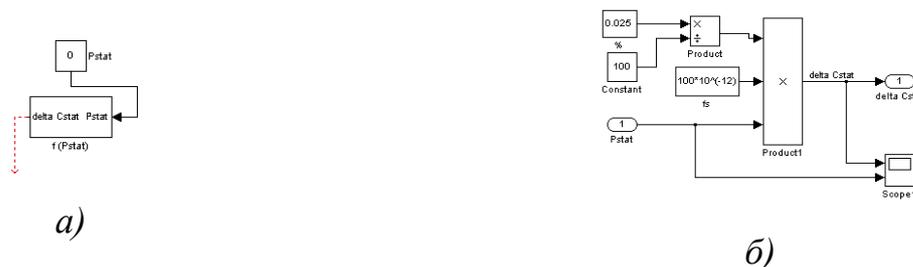


Рисунок 3.8 – Подсистема функции $f(P_{\text{стат}})$ (а), содержание подсистемы (б)

Несовершенство технологии изготовления первичного преобразователя характеризуется таким параметром как смещение нулевого сигнала. В модели его можно задать с помощью константы ΔC_{offset} .

На рисунке 3.9 представлен результат моделирования статической характеристики дифференциально-емкостного преобразователя давления,

диапазон измеряемого давлений от -6 до +6 кПа; значения температур: -65 °С, -30 °С, -5 °С, 20 °С, 45 °С, 70 °С, 85 °С. Используются физические параметры преобразователя полученные во 2 главе.

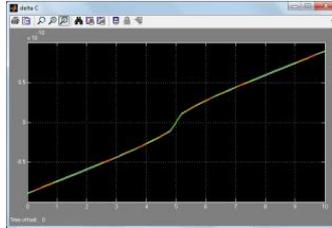


Рисунок 3.9 – Результат моделирования статической характеристики дифференциально-емкостного преобразователя давления

Для каждого значения температуры была рассчитана нелинейность статической характеристики первичного преобразователя. Получены значения точек аппроксимирующей прямой по формуле

$$Y_r = Y_1 + ((X - X_1) * (Y_2 - Y_1)) / (X_2 - X_1), \quad (3.3)$$

где Y_1 - минимальное выходного сигнала ΔC ; X_1 - минимальное значение давления; Y_2 - максимальное значение выходного сигнала ΔC ; X_2 - максимальное значение давления; X - промежуточное значение давления.

Нелинейность рассчитывалась по формуле:

$$N = (Y_k - Y_r) * 100\% / (Y_{kmax} - Y_{kmin}), \quad (3.4)$$

где Y_k - промежуточное значение статической характеристики полученной в результате моделирования; Y_{kmax} - максимальное значение статической характеристики полученной в результате моделирования; Y_{kmin} - минимальное значение статической характеристики полученной в результате моделирования. На рисунке 3.10 представлены графики нелинейности статической характеристики модели первичного преобразователя.

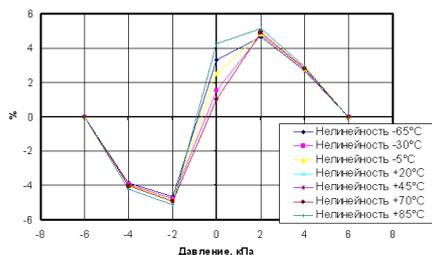


Рисунок 3.10 – Нелинейность статической характеристики модели дифференциально – емкостного первичного преобразователя в диапазоне температур от -65°C до $+85^{\circ}\text{C}$ и диапазоне давлений от -6кПа до $+6\text{кПа}$

В результате моделирования получено, что максимальная нелинейность равна 4,26% от ВПИ. Рассчитана дополнительная температурная погрешность по формуле:

$$\alpha_{\text{ТЕМП}} = \frac{\Delta C_{\text{ТЕМП}} \cdot 10^{\circ}\text{C}}{\Delta t \cdot \text{ВПИ}} \cdot 100\% = \frac{1,35n\Phi \cdot 10^{\circ}\text{C}}{150^{\circ}\text{C} \cdot 100n\Phi} \cdot 100\% = 0,09\% \text{ВПИ} / 10^{\circ}\text{C} \quad (3.5)$$

В качестве сенсора температуры используется температурный датчик - диод. Характеристика диода представляется следующей зависимостью [59-61]:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}} - 1 \right) \quad \text{для } U_D \geq 0, \quad (3.6)$$

где I_D - прямой ток диода, I_S - обратный ток насыщения $\approx 10^{-12} \dots 10^{-6}$ А, U_D - прямое падение напряжения на диоде, $U_T = kT/q$ - температурное напряжение, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ ВАс/К - постоянная Больцмана, $q = 1,602 \times 10^{-19}$ Ас - элементарный заряд, T - температура в кельвинах, $n \approx 1 \dots 2$ - коэффициент эмиссии.

При более детальном анализе вместо (3.6) следует использовать следующей зависимостью:

$$I_D(U_D, T) = I_S(T) \cdot \left(e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T(T)}} - 1 \right) \quad (3.7)$$

Если $U_D \gg n \cdot U_T$, то можно воспользоваться приближением

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{U_D}{n \cdot U_T}}, \quad (3.8)$$

отсюда для напряжения получим

$$U_D = f(T) = n \cdot U_T \ln \frac{I_D}{I_S} \quad (3.9)$$

Подсистема функции $f(T)$ и её содержание представлены на рисунке 3.11.

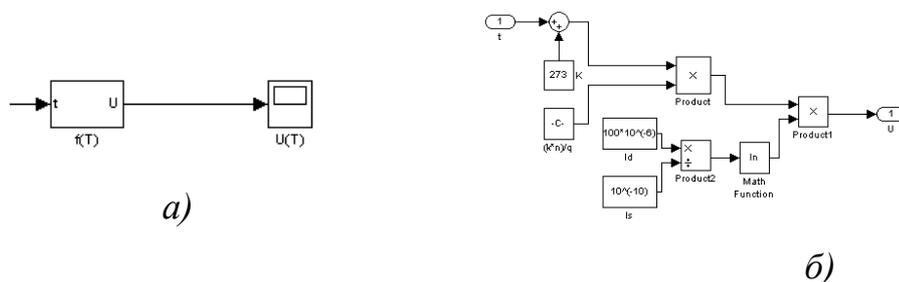


Рисунок 3.11 – Подсистема задания функции $f(T)$ (а) и её содержание (б)

Чтобы получить характеристику температурного датчика емкостной ячейки на вход подсистемы задания функции $f(T)$ была подана линейно возрастающая температура от -65 до $+85^\circ\text{C}$. В результате моделирования на выходе подсистемы было зарегистрировано изменение прямого падения на диоде U_D от температуры (рисунок 3.12).

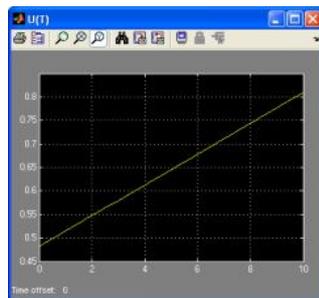


Рисунок 3.12 – Характеристика температурного датчика, полученная в результате моделирования

Для синтеза и анализа динамических характеристик первичного преобразователя в модель добавлена его передаточную функцию. Передаточная функция задается библиотечным блоком «Transfer Fcn» определяется выражением (2.1). На рисунке 3.13 представлена реакция преобразователя на единичный скачок давления до величины верхнего предела измерения 6кПа , при постоянной времени $T = 1\text{с}$.

Изменяя постоянную времени T первичного преобразователя можно добиться минимального значения ДПП и максимальной ширины ППЧ, то есть выполнить параметрический синтез.

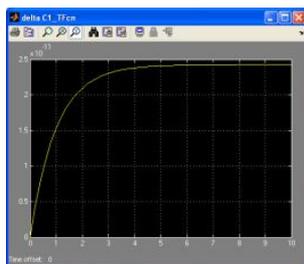


Рисунок 3.13 – Реакция преобразователя на единичный скачок давления до величины верхнего предела измерения

Рабочее окно разработанной модели дифференциально-емкостного преобразователя давления представлено на рисунке 3.14.

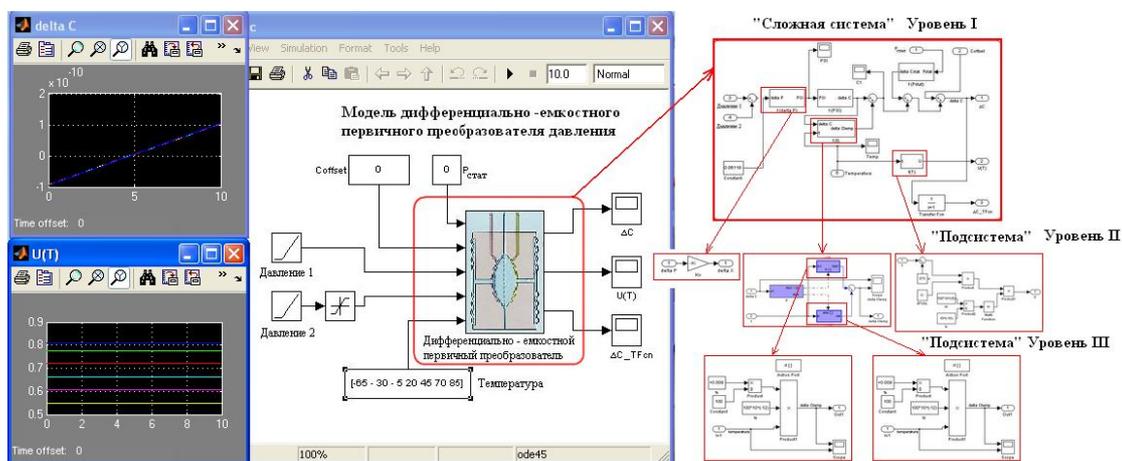


Рисунок 3.14 – Системная модель для синтеза и анализа статических и динамических характеристик дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления

Системная модель дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления реализует этап структурно-параметрического синтеза и анализа статических и динамических характеристик ПП давления с учетом погрешностей параметров и ВВФ. Позволяет рассчитать параметры статической характеристики в соответствии с критериями минимума погрешности приближения и минимума математического ожидания квадрата погрешности приближения. Модель позволяет выполнить синтез и анализ параметров передаточной характеристики первичного преобразователя давления на соответствие критериям минимума ДПП и максимума ширины ППЧ.

3.2 Разработка системной модели для синтеза и анализа статических и динамических характеристик преобразователя электрических сигналов в цифровой код (АЦП)

Измерить выходной сигнал ΔC дифференциально – емкостного первичного преобразователя можно с помощью подсчета количества тактовых импульсов за время заряда конденсаторов до напряжения $U_{\text{конд}}$ и их разряда до напряжения меняющего состояние устройства (триггера) $U_{\text{триг}}$ (рисунок 3.15).

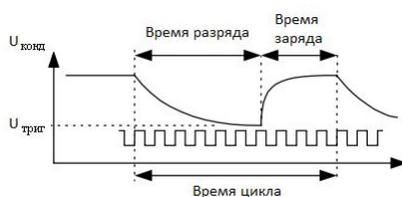


Рисунок 3.15 – Метод измерения емкости конденсатора с помощью подсчета тактирующих импульсов

Данный метод обеспечивает высокую скорость и точность измерения емкости, малое энергопотребление. В качестве аналога такого измерительного модуля выбран АЦП PS021 фирмы АСАМ (Германия) на основе TDC (time-to-digital converter - преобразователь времени в цифровой код) технологии [49]. Принцип работы, технические характеристики и функциональная схема микросхемы приведены в приложении В, рисунки В.1-В.3.

При проектировании схемы включения первичного преобразователя давления необходимо получить значения номиналов элементов, длительность одного цикла заряда и разряда емкостей $C1$ и $C2$, полное время измерения емкостей $C1$ и $C2$ и другие статические и динамические характеристики. Необходимо разработать системную модель проектного решения в среде MATLAB, используя главное расширение Simulink. Структурная схема модели преобразователя электрических сигналов (АЦП) представлена на рисунке 3.16.

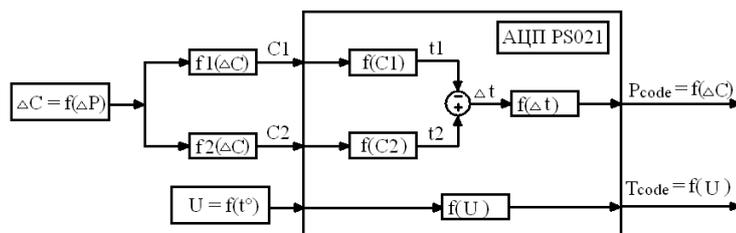


Рисунок 3.16 – Структурная схема системной модели преобразователя электрических сигналов

Выходной сигнал дифференциально-емкостного преобразователя представляет собой разность емкостей $\Delta C = f(\Delta P) = C2 - C1$. В зависимости от знака ΔC одна из емкостей $C1$ или $C2$ увеличивается, а другая уменьшается на величину равную $\Delta C/2$. Разность емкостей ΔC задана блоком ΔC . Емкость $C1 = C_{\text{ном}} - \Delta C/2$, а $C2 = C_{\text{ном}} + \Delta C/2$, где $C_{\text{ном}}$ – номинальная емкость, при $\Delta P = 0$, $C_{\text{ном}} = 140$ Пф [44].

На следующем этапе необходимо рассчитать времена $t1$ и $t2$ одного измерения емкостей $C1$ и $C2$. Для этого необходимо найти время разряда и время заряда емкостей $C1$ и $C2$. Время разряда $t1_{\text{разр}}$ емкости $C1$ рассчитывается по формуле

$$t1_{\text{разр}} = -C1 \cdot R_{\text{разр}} \cdot \ln \left(\frac{U_{\text{разр}}}{U_{\text{зар}}} \right), \quad (3.10)$$

где $U_{\text{разр}}$ – напряжение, до которого разряжается конденсатор, $U_{\text{зар}}$ – напряжение, до которого был заряжен конденсатор, $R_{\text{разр}}$ – резистор, через который разряжается конденсатор (на рисунке 3.13 - $R2$). Для расчета времени разряда емкости $C1$ используется подсистема $t1_{\text{разр}}$ (рисунок 3.17).

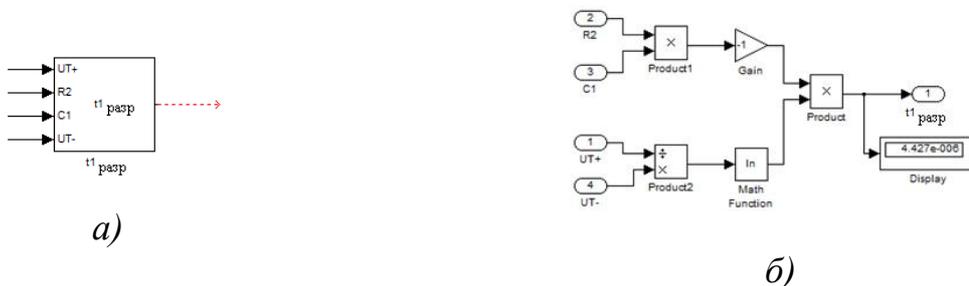


Рисунок 3.17 – Подсистема вычисления времени разряда емкости $C1$ (а), её содержание (б)

На рисунке 3.17 $UT+$ - верхний порог напряжения изменения состояния триггера, $UT-$ - нижний порог напряжения изменения состояния триггера, $UT+$,

UT- и R2 задаются как исходные данные в начале моделирования. В результате моделирования время разряда $t1_{разр}=4,427$ мкс при R2=82 кОм. Напряжение разряда $U1_{разр}$ рассчитывается по формуле

$$U1_{разр}(t) = U_{зар} \cdot e^{\frac{-t}{R_{разр} \cdot C1}}, \quad (3.11)$$

На рисунке 3.18 представлена подсистема отображения графика изменения напряжения на емкости C1 во время разряда.

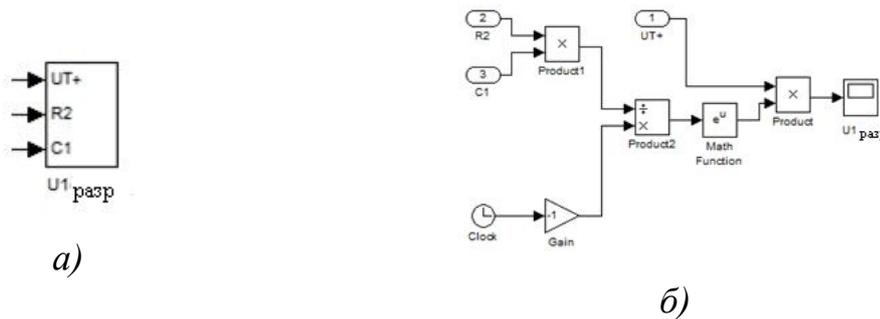


Рисунок 3.18 – Подсистема отображения графика изменения напряжения на емкости C1 во время разряда (а), содержание подсистемы (б)

На рисунке 3.19 представлен график изменения напряжения $U1_{разр}$ на емкости C1 во время разряда.

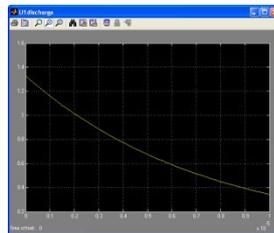


Рисунок 3.19 – Изменение напряжения на емкости C1 во время разряда

Для расчета времени разряда емкости C2 и изменения напряжения используются подсистемы $t_{разр}$ и $U2_{разр}$ аналогичные подсистемам $t1_{разр}$ и $U1_{разр}$. В результате моделирования время разряда $t2_{разр}=9,346$ мкс.

Время заряда $t1_{зар}$ емкости C1 рассчитывается по формуле

$$t1_{зар} = -C1 \cdot R_{зар} \cdot \ln\left(1 - \frac{U_{зар}}{U_{num}}\right) + C1 \cdot R_{зар} \cdot \ln\left(1 - \frac{U_{разр}}{U_{num}}\right), \quad (3.12)$$

где $U_{зар}$ – напряжение, до которого заряжается конденсатор, U_{num} – напряжение питания схемы, $R_{зар}$ – резистор, через который заряжается

конденсатор (R1 на рисунке В.1). Для расчета времени заряда емкости C1 используется подсистема $t1_{зар}$ (рисунок 3.20).

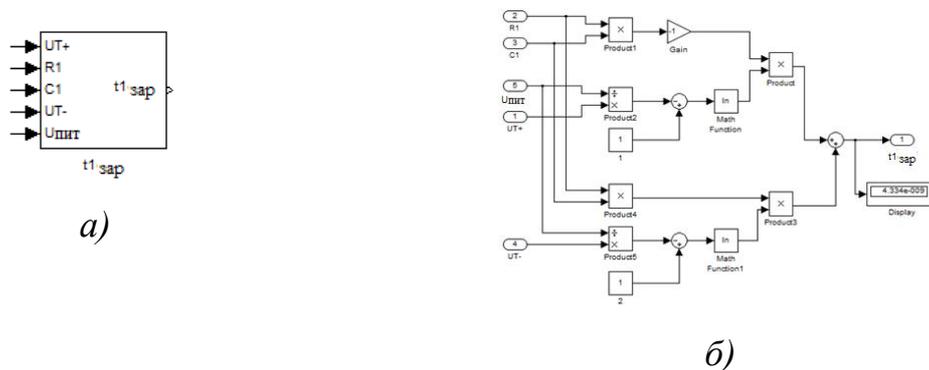


Рисунок 3.20 – Подсистема вычисления времени заряда емкости C1 (а),
содержание подсистемы (б)

$UT+$, $UT-$, $U_{пит}$ и $R1$ задаются как исходные данные в начале моделирования. В результате моделирования время заряда $t1_{зар}=4,334$ нс при $R1=100$ Ом. Напряжение заряда $U1_{зар}$ рассчитывается по формуле

$$U1_{зар}(t) = U_{пит} \cdot (1 - e^{\frac{-t}{R_{зар} \cdot C1}}), \quad (3.13)$$

На рисунке 3.21 представлена подсистема отображения графика изменения напряжения на емкости C1 во время заряда.

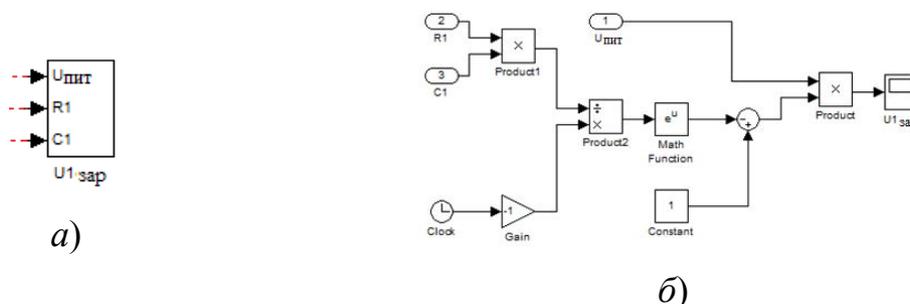


Рисунок 3.21 – Подсистема отображения графика изменения напряжения
на емкости C1 во время заряда (а), содержание подсистемы (б)

На рисунке 3.22 представлен график изменения напряжения $U1_{зар}$ на емкости C1 во время заряда.

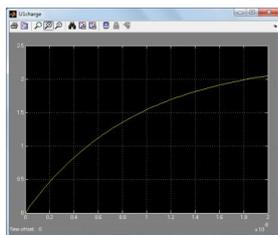


Рисунок 3.22 – Изменение напряжения на емкости C1 во время заряда

Для расчета времени заряда емкости C2 и изменения напряжения используются подсистемы $t2_{зар}$ и $U2_{зар}$ аналогичные подсистемам $t1_{зар}$ и $U1_{зар}$. В результате моделирования время заряда $t2_{зар}=9,149$ нс.

Далее определяем разность времени Δt между измерениями емкостей C1 и C2 по формуле

$$\Delta t = t2_{цикла} - t1_{цикла}, \quad (3.14)$$

где, $t1_{цикла}$ и $t2_{цикла}$ - времена измерения емкостей C1 и C2 определяемые выражениями

$$t1_{цикла} = 8 \cdot (t1_{зар} + t1_{разр}) \text{ и } t2_{цикла} = 8 \cdot (t2_{зар} + t2_{разр}). \quad (3.15)$$

Расчет Δt в Simulink представлен на рисунке 3.23.

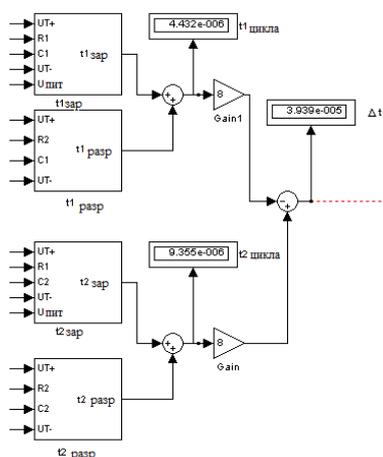


Рисунок 3.23 – Расчет Δt в Simulink

Конечным этапом моделирования является расчет выходного кода АЦП PS021 по давлению P_{code} и по температуре T_{code} . Исходя из описания работы АЦП PS021 [49] можно сделать вывод, что если разность времён Δt равна -40 мкс, то выходной код по давлению P_{code} равен -25000.00. Если разность времён Δt равна +40 мкс, то выходной код по давлению P_{code} равен +25000.00. Зависимость P_{code} от Δt описывается уравнением:

$$P_{code}(\Delta t) = \Delta t \cdot 625 \cdot 10^6 \quad (3.16)$$

Выходной код по температуре рассчитывается следующим образом: если выходное напряжение с температурного диода равно 0 В, то выходной код равен 0.0000, если выходное напряжение с температурного диода равно напряжению питания АЦП PS021, то выходной код равен 4.0000. Зависимость T_{code} от U описывается уравнением:

$$T_{code}(U) = 4 \cdot U / U_{пит}, \quad (3.17)$$

где U - напряжение на температурном диоде, задается как исходные данные.

Для синтеза и анализа динамических характеристик первичного преобразователя в модель необходимо добавить его передаточную функцию (2.2). На рисунке 3.24 представлена реакция преобразователя ΔC в цифровой код на единичный скачок давления до величины верхнего предела измерения 6кПа при этом $\Delta C = \max$, а постоянная времени $T = 0,1$ с.

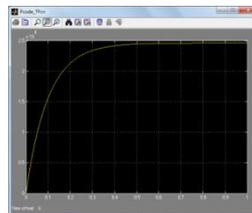


Рисунок 3.24 – Реакция преобразователя ΔC в цифровой код на единичный скачок давления до величины верхнего предела измерения

Рабочее окно разработанной модели преобразователя электрических сигналов представлено на рисунке 3.25. Модель реализует этап структурно-параметрического синтеза и анализа статической характеристики выходного сигнала преобразователя электрических сигналов (давления и температуры) в цифровой код с учетом погрешностей и ВВФ. Имеется возможность рассчитать номиналы электронной схемы с возможными допусками, а также режимы её работы. Модель позволяет выполнить синтез и анализ параметров передаточной

функции преобразователя электрических сигналов на соответствие критериям минимума ДПП и максимума ширины ППЧ.

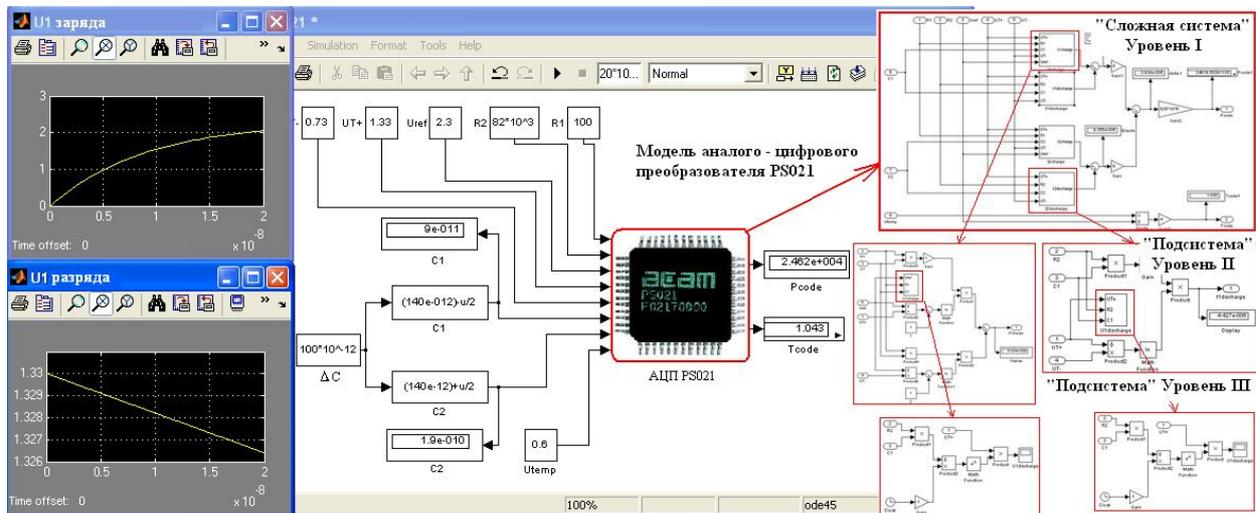


Рисунок 3.25 – Системная модель для синтеза и анализа статических и динамических характеристик преобразователя электрических сигналов

3.3 Разработка расчетных моделей для синтеза и анализа параметров конструкции датчика давления с помощью интеграции ECAD и MCAD систем

При проектировании конструкции датчика давления осуществляется разработка конструкции корпуса и модуля первичного преобразователя датчика давления, сквозное проектирование электронных модулей в ECAD и MCAD системах и проведение поверочных расчетов. Для выполнения перечисленных действий необходимо разработать модели для синтеза и анализа параметров конструкции датчика давления в САПР инженерного анализа.

В работе в качестве ECAD системы использовалась САПР Mentor Graphics, в качестве MCAD системы – SolidWorks. Процедура проектирования 3D - модели печатной платы электронных модулей начинается с обмена данными между системами. Для обмена данными использовался модуль CircuitWorks, входящий в состав SolidWorks 2008 SP4.0. CircuitWorks в своей работе использует файлы формата intermediate data format (IDF) 2.0- 4.0.

Основным этапом разработки модели печатной платы является создание библиотеки компонентов и осуществление связи между их двумерными изображениями и 3D-моделями. В САПР Mentor Graphics с помощью модуля Library manager создается посадочное место компонента на печатной плате, далее разрабатываются 3D-модели элементов в MCAD системе.. Для проектирования печатной платы в САПР Mentor Graphics имеется специализированный модуль Expedition PCB [62]. Разработанная печатная плата процессорного модуля обработки информации датчика давления представлена на рисунке 3.26.

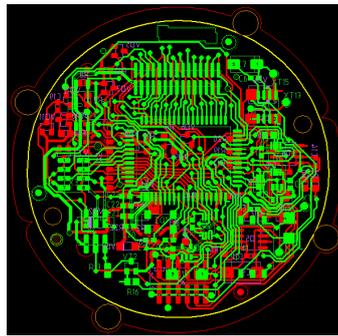


Рисунок 3.26 – Печатная плата процессорного модуля обработки информации датчика давления

Для передачи данных о печатной плате в модуль CircuitWorks необходимо выполнить экспорт данных из Mentor Graphics с помощью рассмотренного IDF файла. Открытый IDF файл в CircuitWorks платы процессорного модуля обработки информации датчика давления представлен на рисунке 3.27.

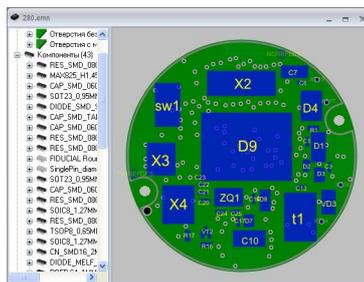


Рисунок 3.27 – IDF файл процессорного модуля обработки информации датчика давления, открытый в CircuitWorks

Следующим шагом необходимо указать всем компонентам их трехмерные модели. Все необходимые операции проводятся в библиотеке компонентов CircuitWorks. В случае, если 3D - модели элементов отсутствуют, или необходимо упростить модель для проведения моделирования, то SolidWorks автоматически

построит 3D - модель по габаритным размерам элемента. Модель для синтеза и анализа конструкции печатной платы процессорного модуля обработки информации датчика давления представлена на рисунках 3.28,2.29.

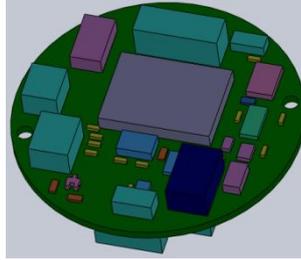
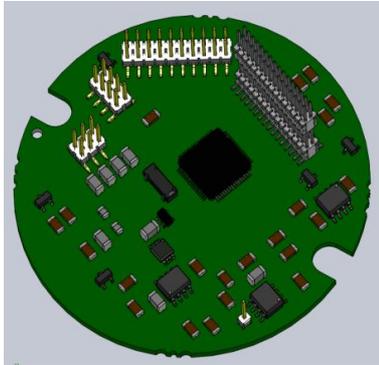
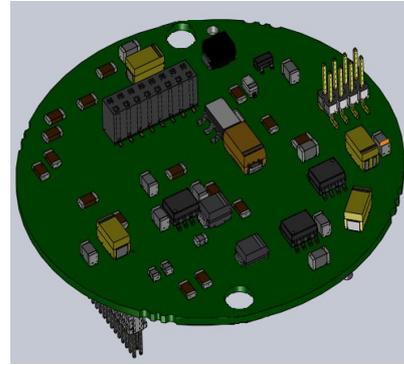


Рисунок 3.28 – Модель процессорного модуля обработки информации с автоматически построенными элементами в SolidWorks



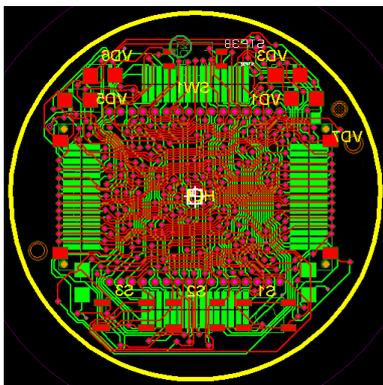
a)



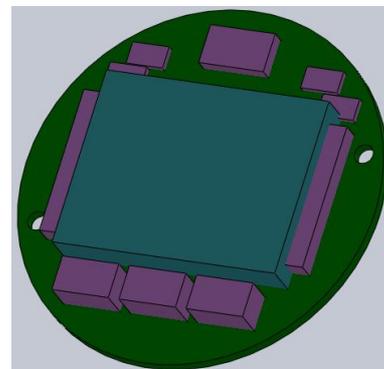
б)

Рисунок 3.29 – Верхняя сторона модели процессорного модуля обработки информации (*a*), нижняя сторона модели (*б*)

Следуя описанной выше методике, разрабатываются модели остальных электронных модулей датчика давления (рисунки 3.30 - 3.32).



a)



б)

Рисунок 3.30 – Печатная плата модуля отображения и ввода информации (*a*), модель модуля отображения и ввода информации (*б*)



Рисунок 3.31 – Печатная плата модуля электромагнитной совместимости (а), модель модуля электромагнитной совместимости (б)

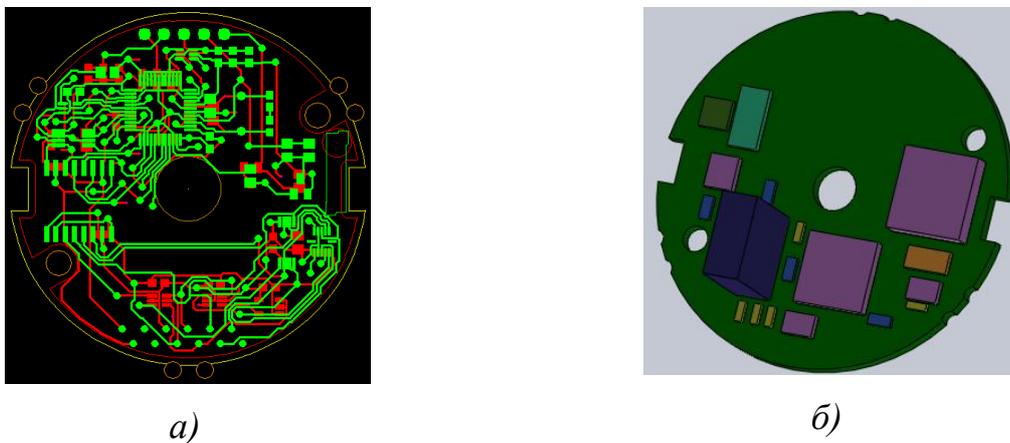


Рисунок 3.32 – Печатная плата модуля обработки сигналов первичного преобразователя (а) её модель модуля обработки сигналов первичного (б)

Затем осуществляется сборка моделей корпуса датчика давления, модуля первичного преобразователя давления и печатных плат. На этом этапе устраняются ошибки, допущенные при расчете габаритных размеров, и определяются оптимальные позиции ключевых компонентов (больших элементов, разъемов, кнопок и т.д.). В разработанные модели печатных плат можно внести изменения, которые с помощью обратной связи (back annotation) будут переданы из SolidWorks в Mentor Graphics для модификации трассировки печатных плат [63,64]. На рисунке 3.33 представлена разработанная модель для синтеза и анализа конструкции датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, выполненная при интеграции ECAD системы Mentor Graphics и MCAD системы SolidWorks.

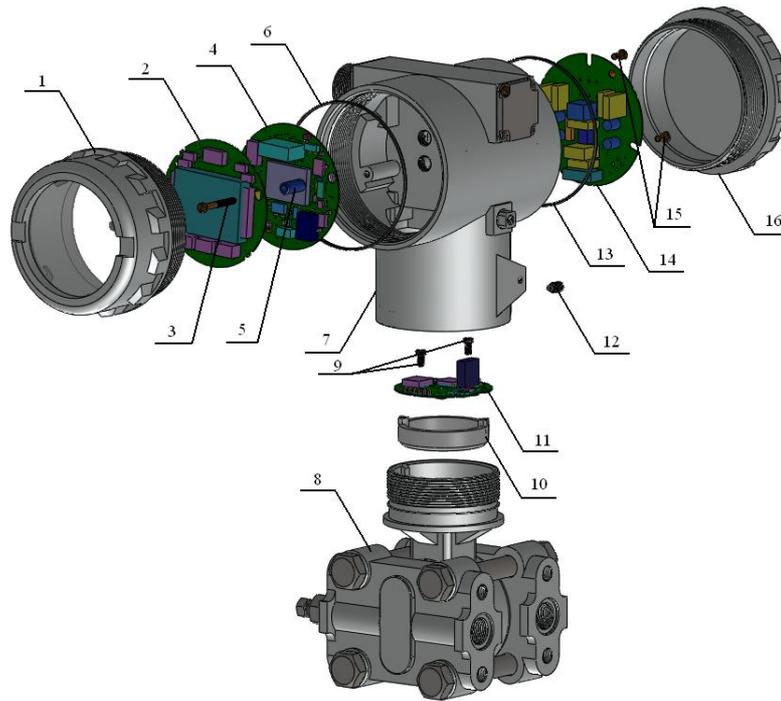


Рисунок 3.33 – Модель для синтеза и анализа конструкции датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем

Типовая конструкция для выбранного класса датчика давления 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.

С целью определения способности датчиков давления выполнять свои функции, сохраняя параметры в пределах норм, проводят механические испытания. Наибольшее влияние на приборы оказывают вибрационные нагрузки, одиночные и многократные удары, а также воздействие температуры [24]. Постоянный рост функциональности, конструктивной сложности, тепловыделений электрорадиоизделий, ведут к повышению температуры внутри датчика и способствуют увеличению интенсивности отказов электрорадиоизделий за счет их перегрева. Следовательно, одним из важнейших факторов, определяющих эксплуатационную надежность датчика, является

тепловой режим, обеспечение которого связано с выбором таких конструкций печатных плат и корпуса, которые бы не препятствовали, а способствовали рассеиванию теплоты в окружающую среду. Целью теплового расчета является определение температур нагретой зоны и температуры наиболее критичного элемента [66]. В проектируемый датчик давления входит несколько типовых элементов замены выполненных в виде печатных плат, что значительно усложняет и без того громоздкий расчет. Вычислить резонансные частоты датчика давления и его элементов становится практически невозможным. Поэтому на этапе проведения поверочно-конструкторских расчетов для достижения точных и быстрых результатов будут применяться САПР инженерного анализа.

Используя разработанную ранее модель датчика давления с грубыми макромодели электрорадиоизделий и упрощенными моделями печатных плат (без проводников, монтажных и переходных отверстий) в MCAD системе SolidWorks можно провести частотный анализ, анализ на действие удара и расчет теплового режима. Несмотря на то, что расчеты будут выполнены с рядом упрощений, их результаты можно сравнить с заданными на проектирование параметрами и при необходимости внести изменения в конструкцию разрабатываемого датчика давления. Для проверки достоверности результатов моделирования необходимо провести испытания опытного образца датчика давления на воздействия механических факторов и температуры.

3.4 Синтез и анализ конструкции датчика давления на воздействие механических факторов в САПР SolidWorks

При анализе на действие вибраций критерием является резонансная частота датчика давления и его элементов. Частота собственных колебаний печатной платы рассчитывается по формуле [65, 66]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K_\alpha}{a^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{M}\right)} \cdot a \cdot b, \quad (3.18)$$

где a и b длина и ширина пластины; M – масса пластины с элементами; D – цилиндрическая жесткость; K_α - коэффициент, зависящий от способа закрепления сторон печатной платы, определяется по формуле

$$K_\alpha = k \sqrt{\left(\alpha + \beta \cdot \frac{a^2}{b^2} + \gamma \cdot \frac{a^4}{b^4}\right)}, \quad (3.19)$$

Здесь k , α , β , γ - коэффициенты, соответствующие способу закрепления сторон печатной платы [62]. Цилиндрическая жесткость рассчитывается с помощью выражения

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3.20)$$

где E – модуль упругости; h – толщина пластины; ν – коэффициент Пуассона.

Частотный анализ и анализ на действие удара в MCAD системе SolidWorks осуществляется с помощью модуля CosmosWorks [67]. При проведении частотного анализа в SolidWorks необходимо действовать по приведенной далее методике. Сначала указывается материал элементов входящих в 3D-модель [67]. В качестве материала печатных плат выберем стеклотекстолит фольгированный FR4, материал ЭРИ - керамика фарфор, материал втулок, которыми крепится печатная плата – прессматериал АГ-4В, материал винтов сталь Ст 3 ГОСТ 380-88, корпус - сплав алюминия АЛ2 ГОСТ 1583-93, модуль первичного преобразователя – легированная сталь 08Х17Т ГОСТ 4543-71. Следующим шагом указывается способ закрепления конструкции и внешние воздействующие нагрузки (рисунок 3.34). Датчик давления закрепляется к несущим конструкциям с помощью четырёх винтов, вкручивающихся в модуль первичного

преобразователя. Втулка приклеивается к гидроблоку клеем ВК-9, считаем, что она зафиксирована, внешняя нагрузка – сила тяжести. После определения всех ограничений создаётся сетка конечных элементов. Варьируя параметры сетки (размер элемента, число элементов в окружности, коэффициент увеличения элемента и количество точек Якобиана) можно существенно уменьшить длительность вычислений, однако, точность результатов моделирования будет снижена. На рисунке 3.35 представлены результаты построения расчетной сетки. Красной стрелкой обозначена внешняя нагрузка, зелеными – способ закрепления.

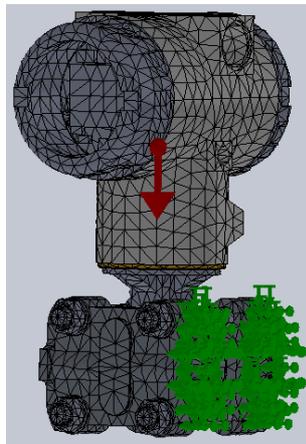


Рисунок 3.34 – Расчетная сетка и ограничения для датчика давления.

В результате расчетов получены формы колебаний конструкции и её резонансные частоты (рисунок 3.35). Особенность программы SolidWorks состоит в том, что при отображении результатов частотного анализа, масштаб деформации конструкции сильно увеличен. В действительности перемещение элементов соответствует миллиметрам или долям миллиметра.

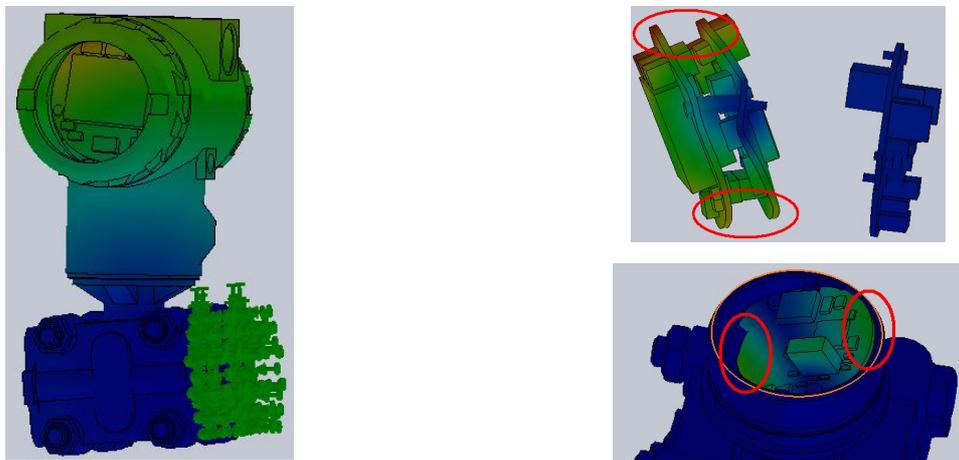


Рисунок 3.35 – Результаты частотного анализа в SolidWorks

Список резонансных частот датчика давления представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Список резонансных частот датчика давления.

Режим No.	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)
1	10688,75	1701,15	0.0005878
2	11385,24	1812,44	0.0005517
3	12576,10	2001,53	0,0004996
4	13412,84	2134,70	0,0004684
5	14284,20	2273,38	0.0004398

В результате моделирования установлено, что резонансные частоты конструкции датчика давления находятся в диапазоне частот воздействующего на датчик давления при его эксплуатации и транспортировании. Также были определены критические места в конструкции датчика давления (на рисунке 3.35 обведены красным цветом). В итоге установлено, что конструкция датчика давления не соответствует требованиям к проектируемому классу датчиков давления, требуется внести изменения, т.е. выполнить синтез.

Для того чтобы избавиться от недостатков разработанной конструкции датчика давления необходимо изменить, конструкцию печатных плат 2, 4 и 11 (см. рисунок 3.33), способ их закрепления, корпус электронного блока 7 и втулки 10. На рисунках 3.36-4.40 показаны новые варианты печатных плат 2, 4 и 11, корпуса 7 и втулки 10.

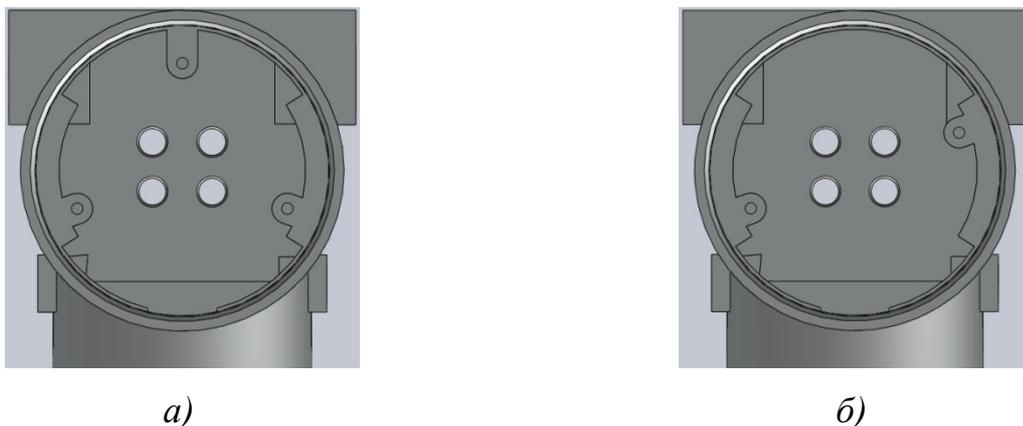
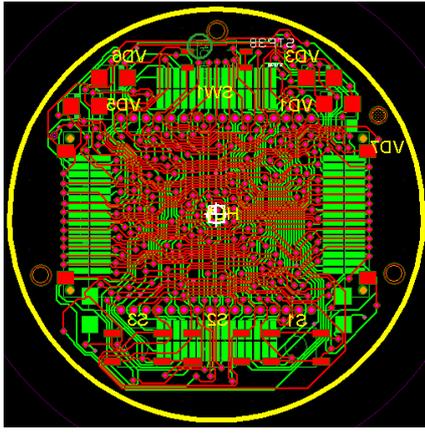
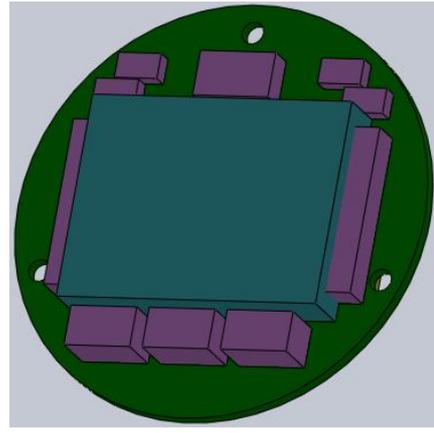


Рисунок 3.36 – Конструкция корпуса ДД после оптимизации (а), конструкция корпуса ДД до оптимизации (б)

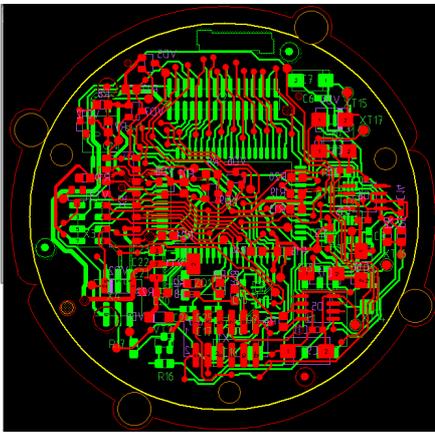


a)

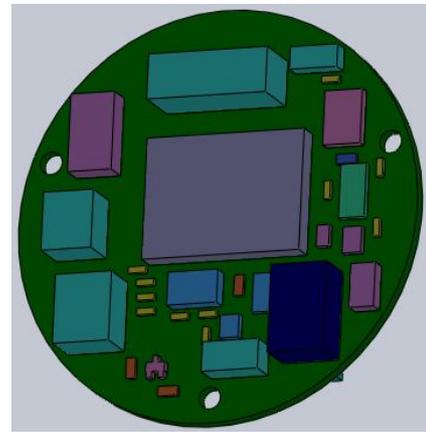


б)

Рисунок 3.37 – Печатная плата модуля отображения и ввода информации после оптимизации (а), модель модуля отображения и ввода информации (б)

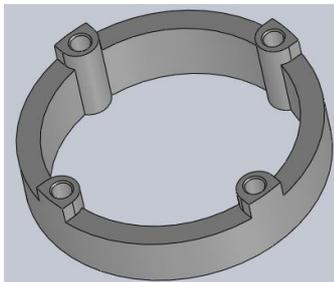


a)

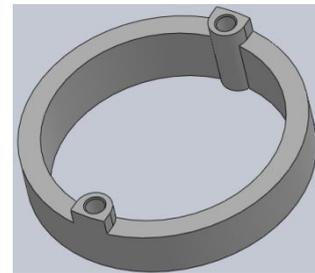


б)

Рисунок 3.38 – Печатная плата процессорного модуля обработки информации после оптимизации (а), модель модуля обработки информации (б)

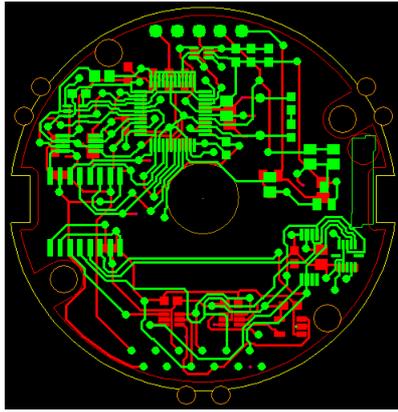


a)

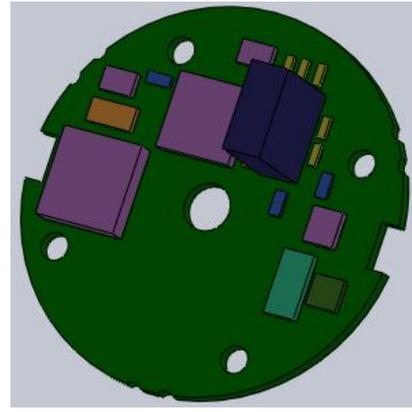


б)

Рисунок 3.39 – Оптимизированная конструкция втулки (а), конструкция втулки до оптимизации (б)



а)



б)

Рисунок 3.40 – Печатная плата модуля обработки сигналов первичного преобразователя после оптимизации (а), модель модуля обработки сигналов первичного преобразователя (б)

С оптимизированной конструкцией корпуса и оптимизированными печатными платами был проведен повторный частотный анализа. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.41.

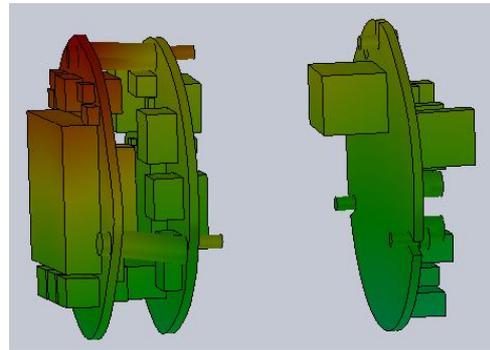
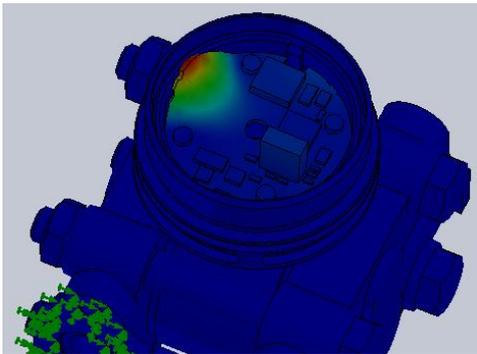


Рисунок 3.41 – Результаты частотного анализа с измененной конструкцией

Список резонансных частот датчика давления с оптимизированной конструкцией представлен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Список резонансных частот ДД с измененной конструкцией.

Режим No.	Частотный (Рад/сек)	Частотный (Герц)	Период (Секунды)
1	15278,20	2431,58	0,0004113
2	16432,88	2615,35	0.0003824
3	17525,15	2789,19	0.0003585
4	17913,33	2850,97	0.0003507
5	19168,03	3050,66	0.0003278

Полученные резонансные частоты лежат за пределами диапазона частот воздействующего на датчик давления при его эксплуатации и транспортировании. Критические места в конструкции датчика давления были устранены.

При расчете на действие удара первоначально определяется условная частота ударного импульса $\omega = \pi/\tau$, где τ - длительность ударного импульса. Затем рассчитывается коэффициент передачи при ударе для полусинусоидального импульса

$$K_y = \frac{2\nu}{\nu^2 - 1} \cos\left(\frac{\pi}{2\nu}\right), \quad (3.21)$$

где ν - коэффициент расстройки, рассчитывается по формуле

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi f_0}, \quad (3.22)$$

где f_0 — частота собственных колебаний (берется из расчета на вибрационные воздействия). Следующим шагом вычисляется ударное ускорение $a_y = H_y \cdot K_y$, где H_y — амплитуда ускорения ударного импульса. На заключительном этапе определяется максимальное относительное перемещение

$$Z_{\max} = \frac{a_y}{2\pi f_0}. \quad (3.23)$$

Проверяется выполнение условий ударопрочности по следующим критериям: для элементов ударное ускорение должно быть меньше допустимого, т.е. $a_y < a_{y.\text{дон}}$; для печатной платы $Z_{\max} < 0.0003 \cdot b$, где b — размер стороны печатной платы, параллельно которой установлены электрорадиоизделия.

Частным случаем ударного воздействия является удар при падении датчика давления. Действующая при этом перегрузка находится следующим образом: определяем относительную скорость соударения

$$V_0 = V_y + V_{\text{от}}, \quad (3.24)$$

$V_y = \sqrt{2gH}$ — скорость датчика давления в момент соударения; H — высота падения датчика давления; $V_{om} = V_y \cdot K_e$ — скорость отскока; K_e — коэффициент восстановления скорости, зависящий от материала соударяющихся тел.

Вычисляем действующее на датчик давления ускорение

$$a_y = V_0 2\pi f_0 \quad (3.25)$$

Затем проверяется выполнение условия ударопрочности.

При анализе ударной нагрузки в SolidWorks необходимо задать высоту падения или скорость при ударе датчика давления. В результате моделирования определено максимальное относительное перемещение элементов $Z_{\max} = 5,95 \cdot 10^{-4}$ м, ударное ускорение $a_y = 14,6$ g. Дополнительных конструкционных мер защиты от ударных воздействий не требуется.

В результате моделирования установлено, что конструкция датчика давления соответствует требованиям, предъявляемым к проектируемому классу датчиков давления.

3.5 Анализ теплового режима датчика давления в САПР SolidWorks

Анализ теплового режима в SolidWorks осуществляется с помощью модуля CosmosWorks, и позволяет исследовать зоны распределение температуры, обусловленные проводимостью, конвекцией и излучением. Также можно определить наиболее холодные и горячие точки в конструкции.

При моделировании необходимо указать термические нагрузки, действующие на элементы ДД. Для тепловыделяющих компонентов задаётся их температура или рассеиваемая мощность [67]. Теплоотвод с печатных плат и корпуса проектируемого класса датчиков давления осуществляется естественной конвекцией, требуется указать коэффициент конвективной теплоотдачи. В нашем случае он равен $5 - 25$ Вт/м²·К. Затем назначается температура окружающей

среды. Моделирование проводилось при температуре окружающей среды равной +85°C. Из анализа электронных схем модулей входящих в состав датчика давления были получены значения рассеиваемой мощности для основных тепловыделяющих элементов. Значения рассеиваемых мощностей представлены в Приложении В таблицы В.1-В.4.

После определения всех ограничений создаётся сетка конечных элементов. На рисунке 3.42 представлены результаты построения расчетной сетки для модуля отображения и ввода информации. Синими стрелками указана рассеиваемая мощность, зелёным - конвекция.

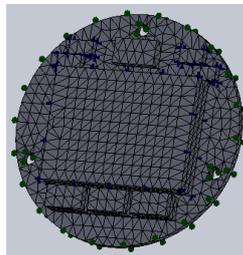


Рисунок 3.42 – Расчетная сетка с ограничениями модуля отображения и ввода информации для теплового анализа

Результаты проведенного теплового анализа модуля отображения и ввода информации представлены на рисунке 3.43.

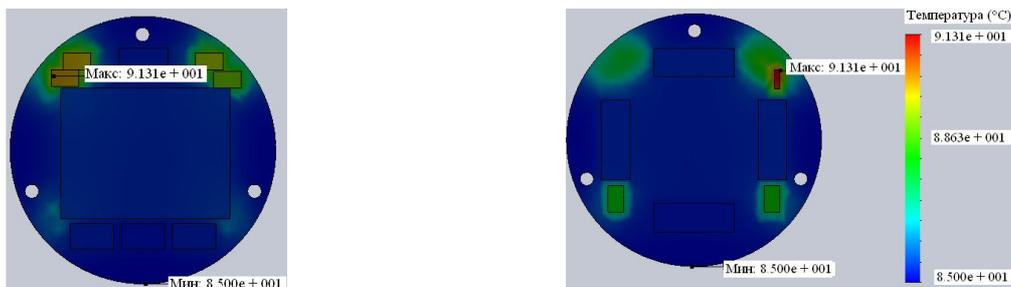


Рисунок 3.43 – Результаты проведенного теплового анализа модуля отображения и ввода информации

При моделировании получено, что самым нагретым элементом является резистор R1 MMA020450BL1%475R в корпусе SMD 0204. При заданных условия его температура равна +91,31°C. По данным технической документации на элемент, рабочий диапазон температур от -55°C до +125°C [68]. Остальные элементы также находятся в допустимом рабочем температурном диапазоне, принудительного охлаждения не требуется.

Результаты проведенного теплового анализа модуля обработки информации представлены на рисунке 3.44.



Рисунок 3.44 – Результаты проведенного теплового анализа модуля обработки информации

При моделировании получено, что самым нагретым элементом является транзистор VT1 транзистор BSP129 в корпусе SOT223. При заданных условия его температура равна $+97,68^{\circ}\text{C}$. По данным технической документации на элемент, рабочий диапазон температур от -55°C до $+150^{\circ}\text{C}$ [69] Остальные элементы также находятся в допустимом рабочем температурном диапазоне.

Результаты проведенного теплового анализа обработки информации представлены на рисунке 3.45.



Рисунок 3.45 – Результаты проведенного теплового анализа модуля обработки информации

При моделировании получено, что самым нагретым элементом является резистор R8 YAGRC0805JR07220RL в корпусе 0805. При заданных условия его температура равна $+94,09^{\circ}\text{C}$. По данным технической документации на элемент, рабочий диапазон температур от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ [70]. Остальные элементы также находятся в допустимом рабочем температурном диапазоне.

Результаты проведенного теплового анализа модуля электромагнитной совместимости представлены на рисунке 3.46



Рисунок 3.46 – Результаты проведенного теплового анализа модуля ЭМС

При моделировании получено, что самыми нагретыми элементами являются катушки индуктивности L2-L5 RLB0608. При заданных условиях их температура равна $+88,27^{\circ}\text{C}$. По данным технической документации, рабочий диапазон температур этих элементов от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ [71]. Остальные элементы также находятся в допустимом рабочем температурном диапазоне.

Далее необходимо выполнить анализ теплового режима датчика в сборе. Теплоотвод с корпуса осуществляется естественной конвекцией, температура окружающей среды равна $+85^{\circ}\text{C}$. Результаты теплового анализа представлены на рисунке 3.47

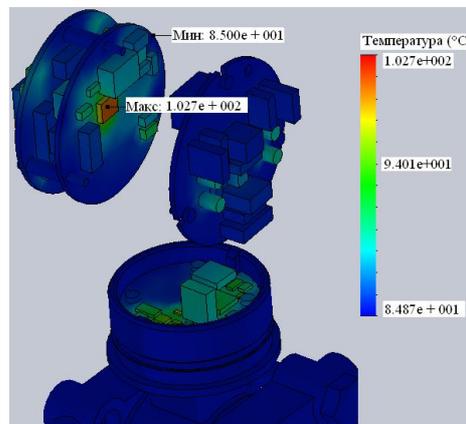


Рисунок 3.47 – Результаты теплового анализа датчика давления в сборе

При моделировании получено, что самым нагретым элементом является транзистор VT1 BSP129 в корпусе SOT223. При заданных условиях его температура равна $+102,7^{\circ}\text{C}$ при рассеиваемой мощности $0,125\text{Вт}$. Повышение температуры транзистора VT1 по сравнению с моделированием, проведенным на отдельном модуле обработки информации, объясняется тем, что в корпусе платы греются сильнее, чем на открытом пространстве в связи с ухудшением конвекции. Разница составила $5,02^{\circ}\text{C}$. Остальные элементы также находятся в допустимом рабочем температурном диапазоне.

3.6 Выводы к главе

В данной главе разработаны системные модели в MATLAB для синтеза и анализа статических и динамических характеристик первичного преобразователя давления и преобразователя электрических сигналов. Исследованы статические и динамические характеристики моделей, получены значения нелинейности и дополнительной температурной погрешности. Разработаны расчетные модели для синтеза и анализа конструкции класса датчиков давления. В САПР SolidWorks проведено исследование конструкции на воздействие вибраций, удара и температуры и выполнен её синтез с устранением недостатков.

1. Разработана системная модель дифференциально-емкостного первичного преобразователя давления, которая обеспечивает решение задачи структурно - параметрического синтеза и анализа статических и динамических характеристик ПП давления с учетом погрешностей параметров и ВВФ. Критериями при расчете являются минимум погрешности приближения и минимум математического ожидания квадрата погрешности приближения, минимум ДПП и максимум ширины ППЧ. Рассчитанная максимальная нелинейность статической характеристики равна 4,26%, дополнительная температурная погрешность 0,09 % ВПИ/10°C.

2. Разработана системная модель схемы преобразования электрического сигнала, обеспечивающая решение задачи структурно - параметрического синтеза и анализа его статических и динамических характеристик. Модель позволяет выполнить анализ режимов работы и выполнить синтез номиналов элементов электронной схемы преобразования емкостного сигнала с учетом допусков.

3. В САПР SolidWorks разработаны расчетные модели, которые позволяют выполнить совместный параметрический синтез конструкции корпуса, функциональных элементов, первичного преобразователя давления и провести частотный и температурный анализ, а также анализ на действие удара при этом реализуется компромисс между длительностью вычислений и точностью результатов моделирования.

Глава 4. Разработка методики проектирования класса датчиков давления и проверка её адекватности

4.1 Разработка методики проектирования датчика давления

Методика проектирования основана на системном подходе к проектированию датчиков давления, представленному в главе 1 п. 1.1. Структурная схема разработанной методики представлена на рисунке 4.1.

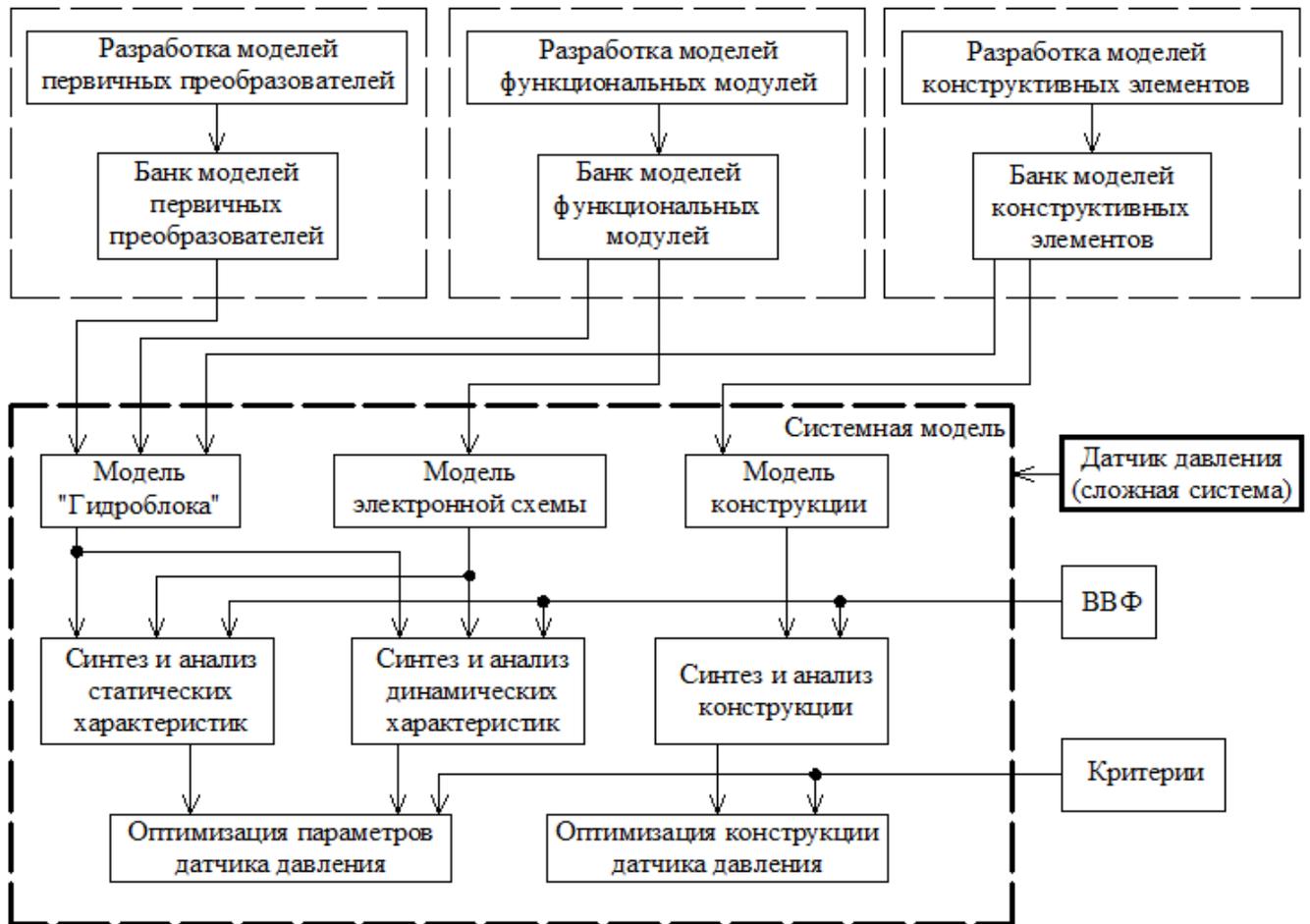


Рисунок 4.1 – Структурная схема методики проектирования класса ДД

Разработка варианта датчика давления выполняется в следующей последовательности:

1. Выполняется разработка системных, структурно - параметрических и расчетных моделей первичных преобразователей давления, функциональных модулей и конструктивных элементов, используя различные САПР.

2. Модели сохраняются в соответствующем банке моделей.

3. Разрабатывается системная модель датчика давления соединением вариантов моделей, выбранного типа первичного преобразователя, функциональных элементов, как аналоговых, так и цифровых, и их конструкции.

4. По структурной схеме датчика давления получаем расчетную статическую характеристики и передаточную функцию.

5. Учитывая ВВФ, выполняются процедуры совместного синтеза и анализа статических, динамических характеристик и параметров конструктивных элементов датчика давления. При этом необходимо придерживаться модернизированного маршрута синтеза и анализа проектного решения, представленного в главе 1 п. 1.1.

6. Используя критерии, в системе в MathCAD или Matlab выполняется оптимизация параметров статической характеристики датчика давления. В разработанных моделях используются следующие методы оптимизации: метод интерполяции, метод наименьших модулей и метод наименьших квадратов.

7. Используя критерии, в системе в MathCAD или Matlab выполняется оптимизация параметров передаточной функции датчика давления. В разработанных моделях используются алгоритмы, представленные в главе 2 п. 2.3.4 и п.2.3.5.

8. Используя критерии, в САПР инженерного анализа выполняется оптимизация параметров конструкции датчика давления. В диссертации в качестве САПР применялась SolidWorks.

Предложенная методика позволяет:

1) учитывать в системной модели датчика давления совместное влияние нелинейности характеристик элементов, внешние воздействующие факторы, допуска на параметры;

2) решена задача коррекции системных моделей. В зависимости от места эксплуатации датчика давления результаты анализа моделей в САПР инженерного анализа используются для внесения поправок в модели разработанные в MathCAD и Matlab.

Варьируемые параметры датчика давления и ограничения оптимизации представлены в главе 2. Критериями оптимизации являются:

- 1) максимальная приведенная погрешность приближения или среднеквадратичная приведенная погрешность приближения;
- 2) ширина полосы пропускания частот и длительность переходного процесса;
- 3) собственная резонансная частота, рабочая температура, ударное ускорение и максимальное относительное перемещение;
- 4) возможно использование комплексного критерия (взвешенная сумма частных критериев или сложная функция).

Используя предложенную методику, применяя различные САПР, имеется возможность разработать быстрый прототип выбранного класса датчика давления. Единый маршрут проектирования датчика давления представлен на рисунке 4.2.

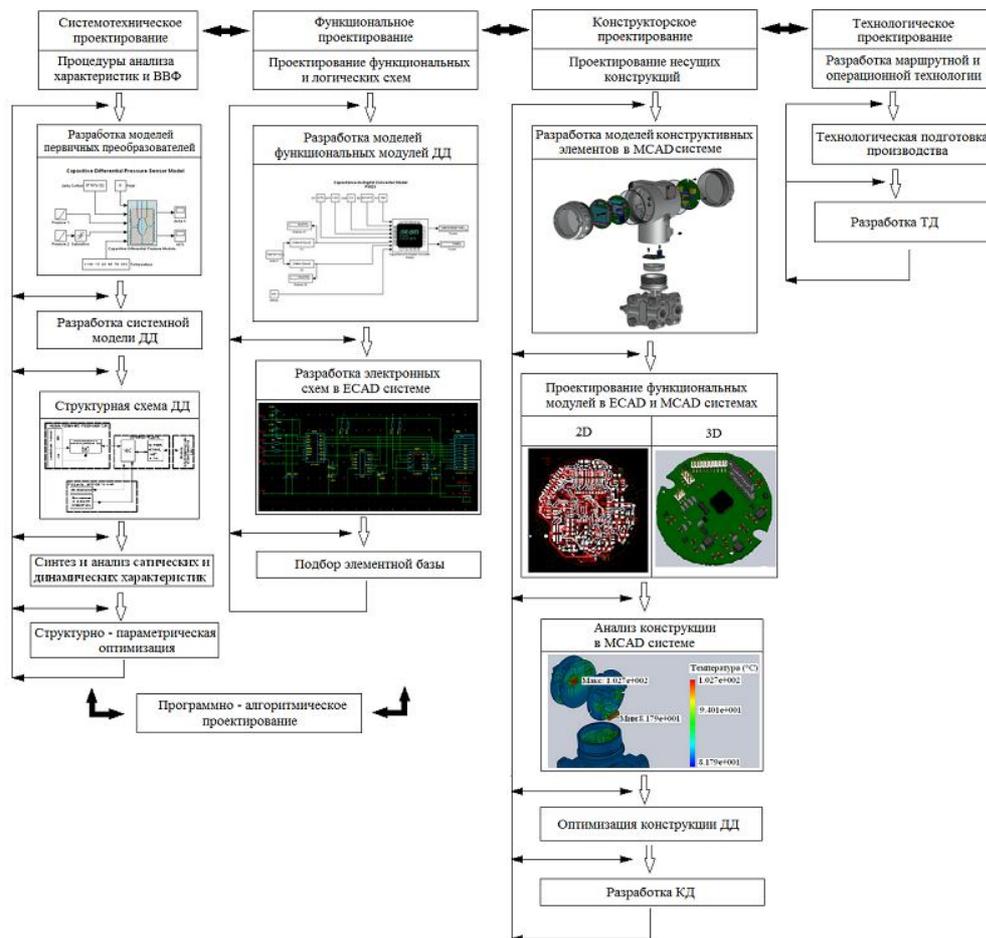


Рисунок 4.2 – Единый маршрут проектирования датчика давления

4.2 Проверка адекватности предложенной методики с помощью исследование характеристик разработанного датчика давления

Для проверки адекватности предложенной методики и оценки точности разработанных моделей был изготовлен опытный образец датчика давления с дифференциально – емкостным первичным преобразователем.

Структурная схема опытного образца соответствует типовой структурной схеме интеллектуального ДД, представленной на рисунке 1.7. Фотография изготовленного опытного образца представлена на рисунке 4.3.

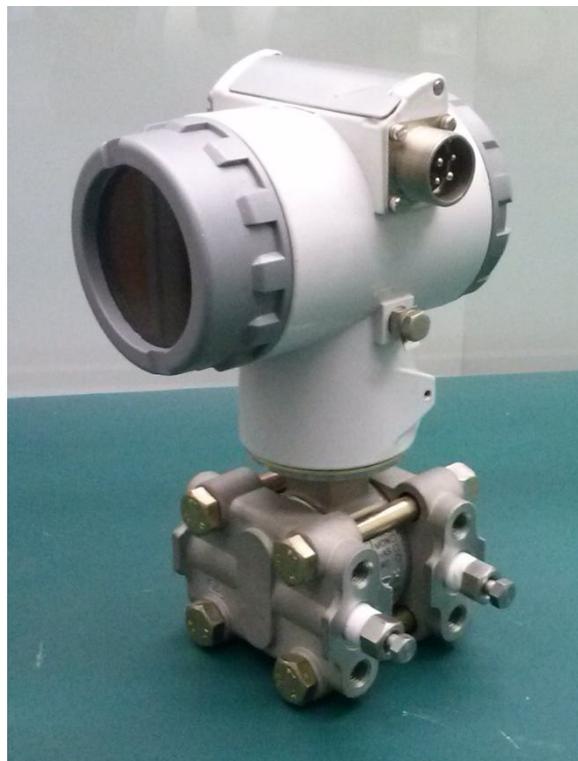


Рисунок 4.3 – Опытный образец ДД с емкостной ячейкой 315M-DP

Было проведено исследование статической характеристики разработанного датчика при воздействующих факторах аналогичных заданным во время проведения компьютерного моделирования в системе MATLAB: диапазон давлений от -6 до 6 кПа; значения температур: -65 °С, -30 °С, -5 °С, 20 °С, 45 °С, 70 °С, 85 °С; статическое давление отсутствует. Температура окружающей среды задавалась в камере тепла и холода MC-811P, производитель ESPEC. Результаты исследований представлены на рисунке 4.4.

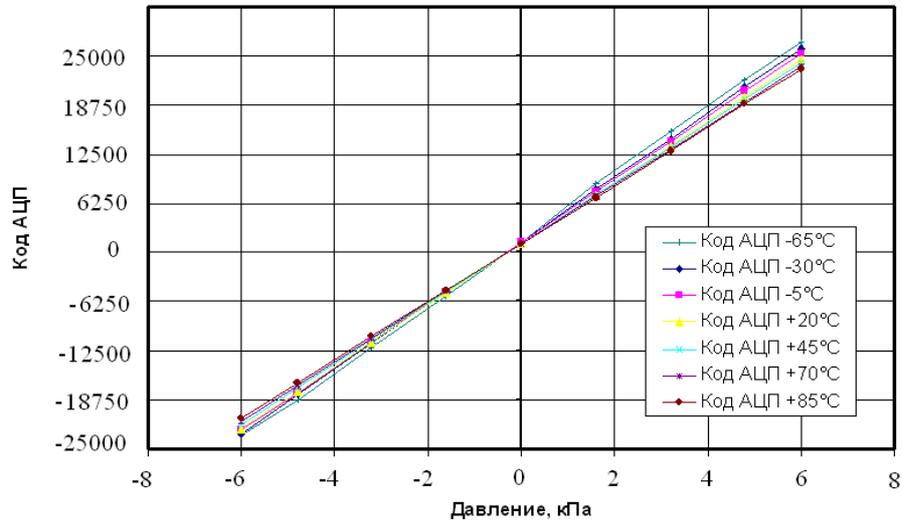


Рисунок 4.4 – Статическая характеристика разработанного датчика давления

Для каждого значения температуры была рассчитана нелинейность статической характеристики по формулам (3.4) и (3.5). На рисунке 4.5 представлены графики нелинейности статической характеристики датчика давления.

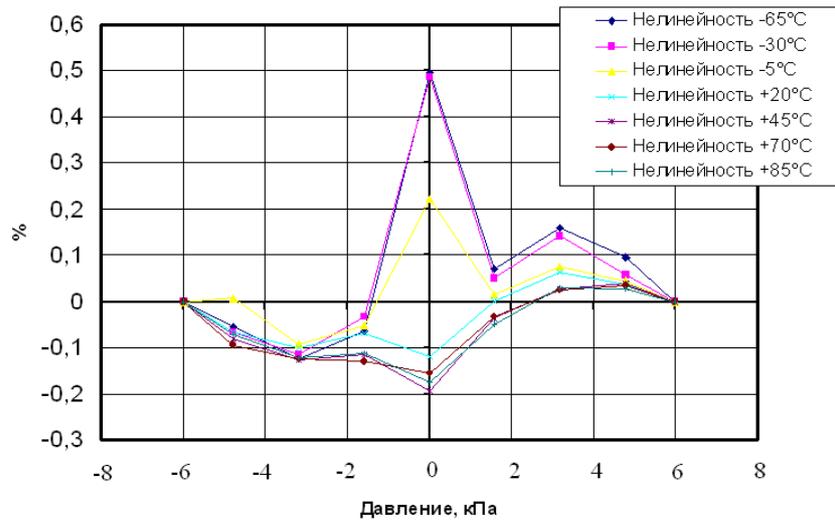


Рисунок 4.5 – Нелинейность статической характеристики разработанного датчика давления

В результате расчетов получено, что максимальное значение нелинейности равно 0,495%. Рассчитана дополнительная температурная погрешность по формуле:

$$\alpha_{\text{ТЕМП}} = \frac{\Delta P_{\text{code}_t} \cdot 10^{\circ\text{C}}}{\Delta t \cdot \text{ВПИ}} \cdot 100\% = \frac{1750 \cdot 10^{\circ\text{C}}}{150^{\circ\text{C}} \cdot 25000} \cdot 100\% = 0,46\% \text{ ВПИ} / 10^{\circ\text{C}}, \quad (4.1)$$

где ΔP_{code_t} - разница между выходными кодами при максимальном давлении для температур - 65°C и +85°C. В таблице № 4.1 приведены сводные данные полученных характеристик при моделировании и натуральных испытаниях.

Таблица № 4.1 – сводные данные полученных характеристик при моделировании и натуральных испытаниях.

	Максимальное значение нелинейности, %	Дополнительная температурная погрешность, % ВПИ/10°C	Отклонение %
Моделирование	4,26	0,09	3,764
Испытания	0,495	0,46	0,37

Разница в полученных данных при моделировании и при натуральных испытаниях объясняется принятыми допущениями при разработке моделей. Для более точных результатов необходимо более детально описать физические процессы, проходящие в элементах датчика давления. В целом можно сказать, что разработанные модели являются адекватными и обеспечивают необходимую точность при проектировании датчиков давления.

На рисунке 4.5 видно, что нелинейность статических характеристик имеет резкий скачок при переходе ΔP от отрицательных значений к положительным. Это можно объяснить явлением так называемого «хлопка мембраны». В результате моделирования и натуральных испытаний предложена методика по отбраковке первичных преобразователей не соответствующим требуемым характеристикам. Методика представляет собой следующую последовательность действий:

1. Подключить первичные преобразователь давления к схеме преобразования электрических сигналов;

2. Последовательно с определенным шагом подавать давления на вход первичного преобразователя в диапазоне от ΔP_{\max} до ΔP_{\min} и считывать значения выходного кода АЦП;

3. Построить график статической характеристики первичного преобразователя и по формулам (3.4) и (3.5) определить её нелинейность и рассчитать максимальное значение;

4. По форме графика и статической характеристики и значению её максимальной нелинейности сделать вывод о соответствии первичного преобразователя требуемым характеристикам.

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

4.3 Испытания разработанного датчика давления на механические воздействия.

С целью подтверждения правильности выбора варианта схемного и конструктивного решения датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем были проведены испытания опытного образца на механические воздействия.

Таблица 4.2 – Приведенная погрешность опытного образца датчика давления в нормальных климатических условиях до проведения испытаний.

Ризм, (кПа)	Выходной сигнал, (мВ)		Приведенная погрешность, %	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	400,1	400,4	+0,006	+0,025
-3	800,2	800,2	+0,013	+0,013
0	1200,3	1200,3	+0,019	+0,019
+3	1600,1	1600,2	+0,006	+0,013
6	2000	2000,2	0,000	+0,013

Испытания на вибропрочность и виброустойчивость проведены на испытательной вибрационной электродинамической установке типа 875Т №SP6549 изготовленной фирмой «Ling Dynamic Systems». На рисунке 4.20 представлен датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем закрепленный на указанной выше установке.



Рисунок 4.6 – Датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, закрепленный на вибрационной установке

Датчик давления подвергся испытаниям на прочность к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,75 мм и в диапазоне частот от 62 Гц до 2000 Гц с амплитудой ускорения 16g (рисунок 4.7).

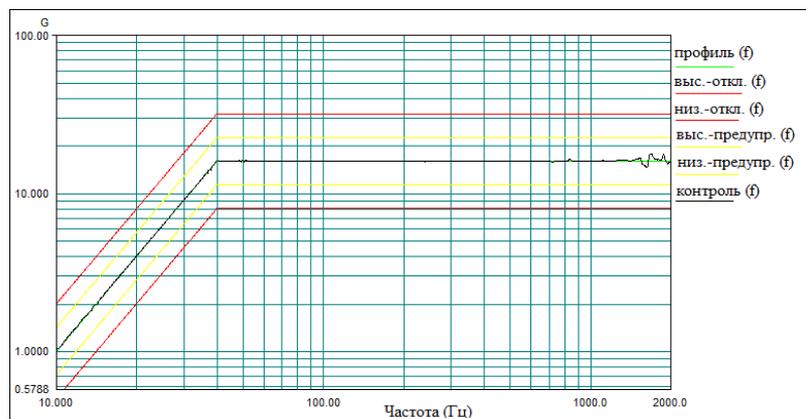


Рисунок 4.7 – График изменения синусоидальной вибрации при испытаниях на вибропрочность

Здесь представлено шесть графиков амплитуд G этих вибраций. Графики (1-5 (снизу вверх) показывают ограничения на допустимые вибрации), график «профиль» - реально действующую нагрузку.

В таблице 4.3 приведены полученные в результате испытаний значения погрешностей макета датчика давления. Максимальное значение основной приведенной погрешности датчика после воздействия синусоидальной вибрации равно $\gamma_{\text{макс}} (\%) = -0,044$.

Таблица 4.3 – Приведенная погрешность опытного образца датчика давления в нормальных климатических условиях после испытаний на вибропрочность.

Р _{изм} , кПа	Выходной сигнал, мВ		Приведенная погрешность, %	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	399,3	399,5	-0,044	-0,031
-3	800,4	799,6	+0,025	-0,025
0	1199,6	1199,8	-0,025	-0,013
+3	1600,2	1600,3	+0,013	+0,019
6	1999,6	1999,7	-0,025	-0,019

Датчик давления подвергся испытаниям на устойчивость к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,35 мм и в диапазоне частот от 62 до 500 Гц с амплитудой ускорения 8g. На рисунке 4.8 представлен график изменения выходного сигнала датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем. Выходной сигнал измерялся на прецизионной катушке P331, номинал сопротивления 100 Ом. Показания с частотой 10 Гц фиксировались на вольтметр универсальный В7-78/1 производитель АК ИП.

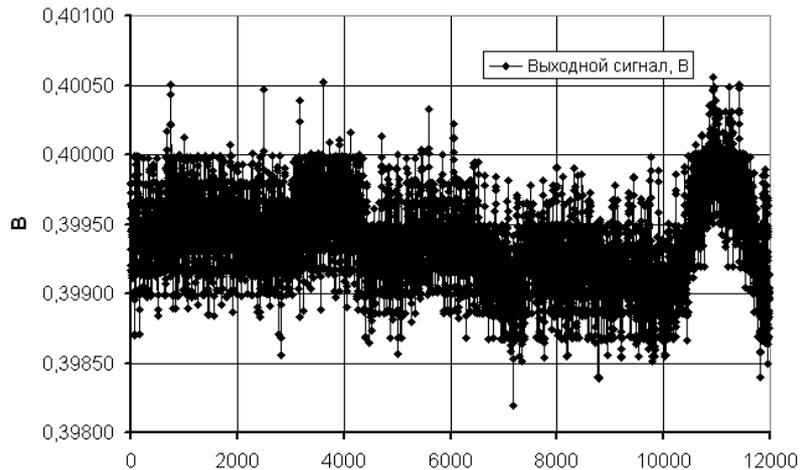


Рисунок 4.8 – График изменения выходного сигнала датчика давления при испытаниях на виброустойчивость для 12000 измерений

В таблице 4.4 даны погрешности опытного образца датчика давления после испытаний на вибропрочность. Максимальное значение дополнительной приведенной погрешности датчика при воздействии синусоидальной вибрации $\gamma_{в.макс}(\%) = 0,093$ и максимальные значения основной приведенной погрешности преобразования после воздействия синусоидальной вибрации $\gamma_{макс}(\%) = 0,069$.

Таблица 4.4 – Приведенная погрешность опытного образца датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем в нормальных климатических условиях после испытаний на виброустойчивость.

Р _{изм} (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	399,7	400,7	-0,019	+0,044
-3	799,4	799,5	-0,038	-0,031
0	1200,1	1200,3	+0,006	+0,019
+3	1600,0	1601,1	0,000	+0,069
6	2000,9	2000,7	+0,056	+0,044

Испытания на прочность к воздействию механического удара проводились на электромеханическом испытательном ударном стенде ST800 страна изготовитель ГДР. На рисунке 4.9 представлен датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем закрепленный на указанном выше стенде.

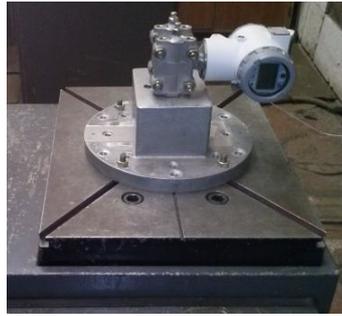


Рисунок 4.9 – Датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, закрепленный на ударном стенде

Датчик давления подвергся испытаниям на прочность к воздействию механического удара многократного действия с пиковым ускорением 60g и длительность ударного импульса от 2 до 5 мс в двух направлениях. Общее число ударов 150. На рисунке 4.10 представлена форма ударного импульса.

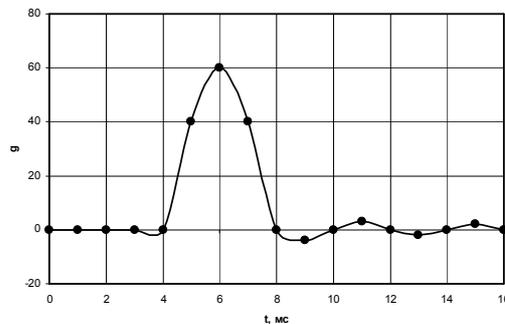


Рисунок 4.10 – Форма ударного импульса многократного действия

Погрешности опытного образца датчика давления после этого воздействия представлены в таблице 4.6. Максимальное значение основной приведенной погрешности $\gamma_{\text{макс}} (\%) = 0,085$.

Таблица 4.6 –Приведенная погрешность опытного образца датчика давления после испытаний на воздействия механического удара многократного действия.

Ризм, кПа	Выходной сигнал, мВ		Приведенная погрешность, %	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	401,2	398,5	0,077	-0,092
-3	801,4	800,7	0,085	0,046
0	1198,8	1200,6	-0,077	0,036
+3	1600,0	1601,3	0,000	0,081
6	2000,7	2001,0	0,044	0,063

Датчик давления подвергся испытаниям на прочность к воздействию механического удара однократного действия с пиковым ускорением 160g и длительность ударного импульса от 0,5 до 30 мс в двух направлениях. Общее число ударов 10. Погрешности опытного образца датчика давления после этого воздействия представлены в таблице 4.7. Максимальное значение основной приведенной погрешности $\gamma_{\text{макс}} (\%) = 0,092$.

Таблица 4.7 – Приведенная погрешность опытного образца датчика давления после испытаний на воздействия механического удара однократного действия.

Ризм, кПа	Выходной сигнал, мВ		Приведенная погрешность, %	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	400,1	400,9	0,004	0,059
-3	801,3	801,5	0,082	0,092
0	1199,3	1200,2	-0,042	0,014
+3	1598,9	1600,3	-0,066	0,021
6	2000,3	2001,1	0,021	0,069

Проведенные предварительные испытания опытного образца датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем на механические воздействия позволяют сделать следующие выводы:

- датчик давления является стойкими к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,35 мм и в диапазоне частот от 62 до 500 Гц с амплитудой ускорения 8g;
- датчик давления является прочными к воздействию синусоидальной вибрации в диапазоне частот от 10 до 62 Гц при амплитуде перемещения 0,75 мм и в диапазоне частот от 62 Гц до 2000 Гц с амплитудой ускорения 16g;
- датчик давления является прочными к воздействию механического удара многократного действия с пиковым ускорением 60g и длительность ударного импульса от 2 до 5 мс в двух направлениях;

- датчик давления является прочными к воздействию механического удара однократного действия с пиковым ускорением 160g и длительность ударного импульса от 0,5 до 30 мс в двух направлениях;

Проведенные предварительные испытания подтверждают точность разработанных в MCAD системе SolidWorks моделей для синтеза и анализа конструкции датчика давления. Используя упрощенные модели элементов датчика давления, был получен результат с высокой степенью соответствия теоретического и реального поведения конструкции. Вариант схемного и конструктивного решения датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем был выбран правильно.

4.4 Испытания разработанного датчика давления на воздействие температуры

Для проверки точности разработанных моделей были получены термограммы макетов функциональных модулей датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем при повышенной предельной температуре + 85⁰С. Снимки термограмм осуществлялись с помощью тепловизора FLUKE Ti10 [72].

Термограмма модуля отображения и ввода информации представлена на рисунке 4.11

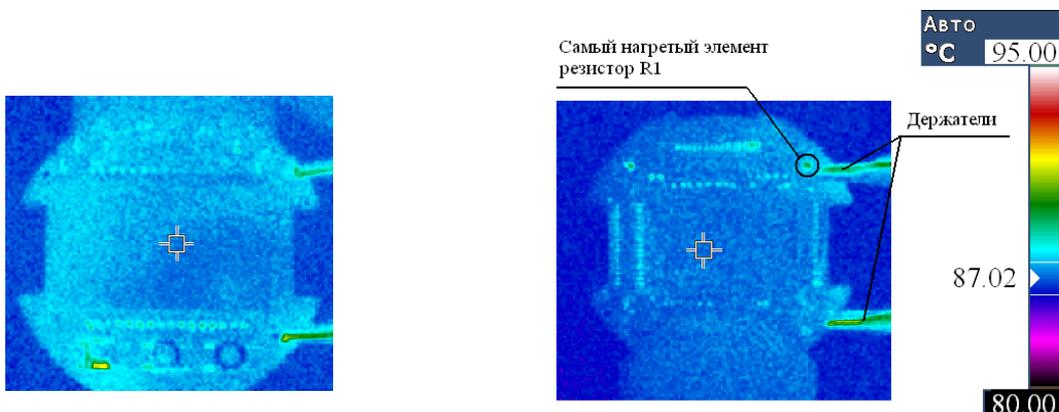


Рисунок 4.11 – Термограмма модуля отображения и ввода информации

В результате испытаний, температура резистора R1 равна 90,0 °С. Погрешность моделирования не превышает 1,5 %.

Термограмма модуля обработки информации представлена на рисунке 4.12

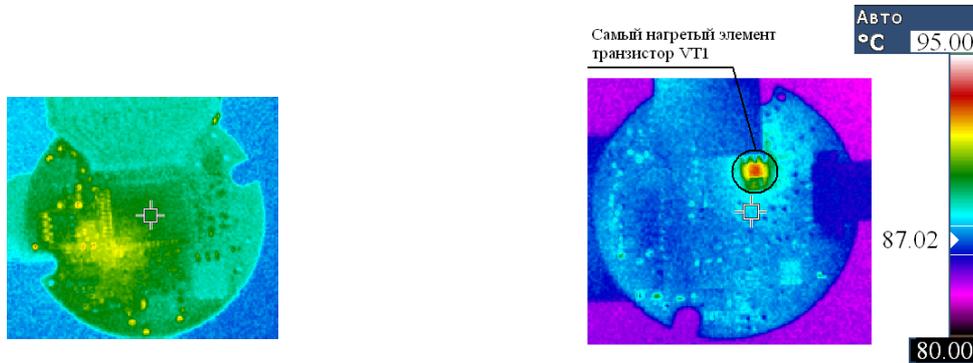


Рисунок 4.12 – Термограмма модуля обработки информации

В результате испытаний, температура транзистора VT1 равна 93,5 °С. Погрешность моделирования не превышает 4,3 %. Термограмма модуля обработки информации представлена на рисунке 4.13

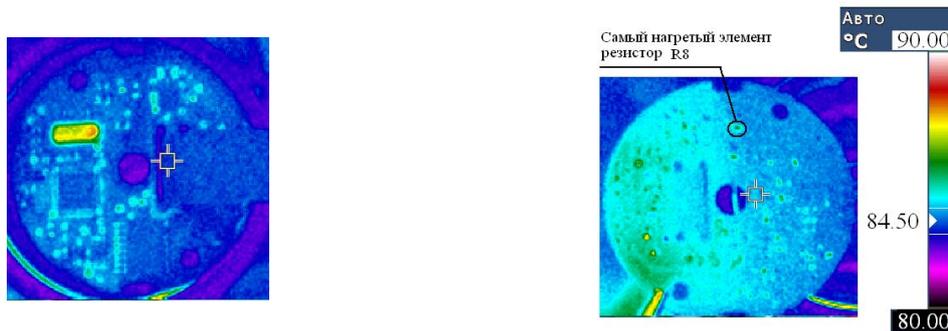


Рисунок 4.13 – Термограмма модуля обработки информации

В результате испытаний, температура резистора R8 равна 88,0 °С. Погрешность моделирования не превышает 6,5 %. Термограмма макета модуля электромагнитной совместимости представлена на рисунке 4.14



Рисунок 4.14 – Термограмма макета модуля электромагнитной совместимости

В результате испытаний, температура индуктивностей L2-L5 равна 85,0 °С. Погрешность моделирования не превышает 3,75 %. В таблице 4.8 представлены сводные данные по результатам моделирования и испытаний.

Таблица 4.8 – Сводные данные результатов моделирования и испытаний опытного образца датчика давления.

Модуль, №	Элемент	Температура моделирования, °С	Температура испытаний, °С	Погрешность моделирования, %
2	R1	91,31	90,0	1,435
4	VT1	97,68	93,5	4,28
14	R8	94,09	88,0	6,47
11	L2-L5	88,27	85,0	3,70

С целью подтверждения точности разработанных моделей для синтеза и анализа конструкции, и подтверждения работоспособности электронных схем в условиях повышенной и пониженной температуры были проведены предварительные испытания опытного образца датчика давления с дифференциально-емкостным преобразователем на воздействия предельных температур – 60⁰С и + 85⁰С. Погрешности опытного образца до проведения температурных испытаний представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Приведенная погрешность опытного образца датчика давления в нормальных климатических условиях до проведения испытаний.

Ризм (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		Приведенная погрешность (%)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	400,1	400,4	+0,006	+0,025
-3	800,2	800,2	+0,013	+0,013
0	1200,3	1200,3	+0,019	+0,019
+3	1600,1	1600,2	+0,006	+0,013
6	2000	2000,2	0,000	+0,013

Испытания на прочность к воздействию пониженной и повышенной температуры проводились в температурной камере МС-811Р производитель ESPEC. На рисунке 4.15 представлен датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, установленный в указанной выше камере.



Рисунок 4.15 – Датчик давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем, установленный в температурной камере

Погрешности опытного образца после воздействия предельных температур представлены в таблицах 4.10, 4.11.

Таблица 4.10 – Дополнительная приведенная температурная погрешность опытного образца датчика давления при температуре +85 °С.

Ризм (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		дополнительная температурная приведенная погрешность (%/10 ⁰ С)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	399,5	399,7	+0,004	+0,004
-3	799,4	799,2	+0,005	-0,006
0	1199,2	1199,1	-0,004	-0,010
+3	1599	1598,9	-0,006	-0,019
6	1998,9	1998,8	-0,012	-0,017

Таблица 4.11 – Дополнительная приведенная температурная погрешность опытного образца датчика давления при температуре -60°C .

Ризм (кПа)	Выходной сигнал (мВ)		дополнительная температурная приведенная погрешность (%/10 ⁰ С)	
	Прямой ход	Обратный ход	Прямой ход	Обратный ход
-6	399,4	399,3	-0,006	-0,010
-3	799,5	799,4	-0,002	-0,004
0	1199,6	1199,6	-0,004	-0,002
+3	1599,6	1599,5	-0,002	-0,002
6	1999,5	1999,5	-0,004	-0,004

Температура корпуса транзистора BSP129, который, как было определено при моделировании, подвержен риску перегрева, была измерена с помощью термопары типа К. Термопара закреплялась к корпусу теплопроводящим компаундом. В результате измерений установлено, что максимальная температура транзистора равна $107,5^{\circ}\text{C}$. Сводные сравнительные данные результатов моделирования и испытаний представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Сводные сравнительные данные результатов моделирования и эксперимента

Элемент	Температура, рассчитанная при моделировании, $^{\circ}\text{C}$	Температура, полученная при эксперименте, $^{\circ}\text{C}$	Точность модели, %
Транзистор BSP129	102,7	107,5	95,5

Проведенные предварительные испытания опытного образца датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем на воздействие повышенных предельных температур -60°C и $+85^{\circ}\text{C}$ позволяют сделать вывод о том, что датчик давления является устойчивым к воздействию пониженной -60°C и повышенной $+85^{\circ}\text{C}$ температурам. Точность разработанных

моделей для синтеза и анализа конструкции датчика давления в MCAD системе SolidWorks составляет 95,5 %. В результате диссертационного исследования на основании разработанных моделей и проведенных исследований предложено техническое решение - полезная модель «Датчик давления» [73], которая позволяет повысить линейность выходной статической характеристики.

Проведенные испытания макетов и опытного образца датчика давления позволяют сказать, что методика проектирования позволяет получить результат с высокой степенью соответствия теоретических и реальных характеристик датчика давления и является адекватной. При этом погрешность определения статических и динамических характеристик не превысила 3,764%, погрешность расчета температурного режима печатных плат не превысила 6,47%, расчета температурного режима датчика в сборе – 4,5%, рассчитанная в результате моделирования собственная частота датчика давления лежит за пределами диапазона действующих частот, что подтвердилось при испытаниях. Основная приведенная погрешность опытного образца датчика давления не превышает 0,1% от ВПИ. Прогнозируемое снижение длительности проектирования датчиков давления на 10-15%.

4.5 Выводы к главе

В настоящей главе разработана методика проектирования класса датчика давления. Предложена методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей. Для подтверждения адекватности предложенной методики проектирования и точности разработанных моделей были проведены испытания разработанного датчика давления с дифференциально - емкостным первичным преобразователем давления.

1. Предложена 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. Разработан опытный образец датчика давления с дифференциально - емкостным первичным преобразователем. В ходе натурных испытаний получено, что максимальное значение нелинейности макета равно 0,495%, а дополнительная температурная погрешность 0,46 % ВПИ/10°C. В результате сравнения характеристик полученных при моделировании и натурных испытания установлено, они отличаются не более чем на 3,764 %, что говорит о точности разработанных моделей.

3. Предложенная методика отбраковки дифференциально-емкостных первичных преобразователей давления не соответствующих требуемым характеристикам, рекомендуется для обеспечения линейности статической характеристики датчика и повышения качества проектных работ.

4. Проведены испытания опытного образца датчика давления на воздействие внешних факторов. Сравнение результатов полученных при моделировании и предварительных испытаний показало, что погрешность разработанных моделей не превышает 6.5%.

5. Основная приведенная погрешность опытного образца датчика давления не превышает 0,1% от ВПИ. Прогнозируемое снижение длительности проектирования датчиков давления на 10-25%.

6. Проведенные испытания опытного образца датчика давления позволяют сказать, что методика проектирования является адекватной и позволяет эффективно решать задачи синтеза и анализа проектных решений с учетом заданных ограничений для выделенного класса датчиков давления.

Заключение

1. Разработаны системные и структурно - параметрические модели дифференциально – емкостного первичного преобразователя давления и преобразования электрического сигнала, 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. Предложенное техническое решение - полезная модель «Датчик давления», позволяет повысить линейность выходной статической характеристики.

Список сокращений

- ЭУ – электронное устройство
- ДД – датчик давления
- ЭРЭ – электрорадиоэлементы
- САПР – система автоматизированного проектирования
- ППл – печатная плата
- СБИС - сверхбольшая интегральная схема
- ПО – программное обеспечение
- ПЛИС – программируемая логическая схема
- ТП – технологический процесс
- ИУС – информационно-управляющая система
- ВПИ – верхний предел измерения
- ДИ – диапазон измерения
- ВВФ – внешние воздействующие факторы
- CAN - Controller Area Network (сеть контроллеров)
- HART - Highway Addressable Remote Transducer (магистральный адресуемый дистанционный протокол)
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- ПП – первичный преобразователь
- СВ – схема включения
- ЭМС – электромагнитная совместимость
- ТЗ – техническое задание
- CAE - Computer Aided Engineering
- CAD - Computer Aided Design
- АСТПП - автоматизированная система технологической подготовки производства
- CAM - Computer Aided Manufacturing
- PDM - Product Data Management
- PLM - Product Lifecycle Management

MCAD - Mechanical CAD

ECAD - Electronic CAD

ЦПУ - центральное процессорное устройство

ЭДС – электродвижущая сила

КрНС – кремний на сапфире

КрНК – кремний на кремнии

СХДД - статическая характеристика датчика давления

МНМ – метод наименьших модулей

МНК – метод наименьших квадратов

МППП - максимальная приведенная погрешность приближения

КНМ – кривая наименьших модулей

ФПРВ – функция плотности распределения вероятностей

КНК – кривая наименьших квадратов

СППП - среднеквадратическая приведенная погрешность приближения

ДПП - длительность переходного процесса

ППЧ - полоса пропускания частот

АЧХ - амплитудно-частотная характеристика

ФЧХ - фазо-частотная характеристика

TDC - time-to-digital converter

МК – микроконтроллер

SPI - последовательный периферийный интерфейс

UART - универсального асинхронный приёмопередатчик

Библиографический список

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. Учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. - 336 с.: ил. - (Сер. Информатика в техническом университете).
2. Советов Б. Я. Моделирование систем: учебник для студ. вузов. - 4-е изд., стереотип. - М. : Высшая школа, 2005. - 343 с. : ил.
3. Советов Б. Я. Моделирование систем: практикум : учеб. пособие для студ. вузов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Высшая школа, 2003. – 296 с.
4. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. - 2-е изд., перераб. - М. : Наука, 1978. - 400 с. : ил.
5. Колесов Ю. Б., Сениченков Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: Учебное пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 224 с: ил.
6. Щепетов А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств: В 3-х частях: Часть 3. Проектирование измерительных устройств. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2009. – 192с.
7. Уржумов Н.А. Создание инструментальной среды структурного синтеза объектов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук.
8. С.В. Акимов. Анализ проблемы автоматизации структурно-параметрического синтеза // Доклады ТУСУРа. - 2011. - №2 (24), часть 2. - С. 204-211.
9. Никонов К.П., Орлов В.П., М.В. Фомина. Совместное использование ЕСАД и МСАД систем при техническом проектировании датчика давления. Журнал «Приборы», №10, стр.15-21, 2011г
10. Никонов К.П. Орлов В.П. Проектирование конструкции датчика давления с помощью интеграции ЕСАД и МСАД 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.

11. Никонов К.П., Орлов В.П. Методика проектирования датчика давления с помощью интеграции ЕСAD и МСAD систем. Научно – практическая конференция студентов и молодых ученых МАИ «Инновации в авиации и космонавтике - 2011». 26 – 30 апреля 2011 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: МЭЙЛЕР, с. 62.

12. Никонов К.П., Орлов В.П. Разработка интеллектуального датчика давления с дифференциально-емкостным первичным преобразователем при совместном использовании сред компьютерной математики, ЕСAD и МСAD систем. Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2012». 17-20 апреля 2012 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». с 112-113.

13. Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой. Р.И. Грушвицкий, А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов .- СПб.: БХВ-Петербург, 2006.-736с.

14. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. В. П. Дьяконов. - М.: СОЛОН-Пресс, 2004.- 384 с.

15. Тику Ш. Эффективная работа: Solid Works2006. СПб.: Питер, 2007. - 720 с.

16. Половко А.М., Бутусов П.Н. MATLAB для студента. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 320с.: ил.

17. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 1104с.: ил.

18. Дьяконов В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007: Самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.: ил.

19. Щепетов А.Г. Автоматизация инженерных расчетов в среде Mathcad: Практическое пособие. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2006. – 264 с.

20. Кирьянов Д.В. Самоучитель Mathcad 11. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003 – 560с.:ил.

21. Тин Чжо. Интеллектуальная поддержка процедур синтеза информационно-управляющих систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014 – 22с.

22. Бельков В.Н., Ланшаков В.Л. Автоматизированное проектирование технических систем. Учебное пособие. Издательство «Академия Естествознания». 2009 – 143 с.

23. 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. – М.: ООО «Принт-салон». с 166-167.

24. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.В. Журавлева и др.; Под общ. ред. В.А. Шахнова. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.: ил. – (Информатика в техническом университете).

25. ГОСТ Р 52931-2008. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия. - М., 2009. - 46с.

26. ГОСТ РВ 20.39.304-98. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам. – М., 1998. – 78с.

27. СТО 1.1.1.07.001.0675-2008. Атомные станции. Аппаратура, приборы, средства систем контроля и управления. Общие технические требования. 2009. - 84с.

28. ГОСТ Р 51330.0-99 (МЭК 60079-0-98). Электрооборудование взрывозащищенное. Часть 0. Общие требования. -М., 2000. - 86с.

29. ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89). Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (Код IP). – М., 2008. – 59с.

30. НПП ЭЛЕМЕР. Преобразователи давления измерительные «ЭЛЕМЕР-АИР-30». Руководство по эксплуатации НКГЖ.406233.007РЭ., 2009 - 173с.

31. ГОСТ Р 8.673-2009. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения. Государственная система обеспечения единства измерения. - М. 2010. - 14с.

32. В.А. Никамин. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Справочник. - СПб.: КОРОНА принт. М.: «Альтекс-А», 2003.- 234 с.

33. Мезрин Е.М., Панферов Д.В., Загузов В.С. Жесткие испытания преобразователей давления – гарантия надежной безопасной эксплуатации атомных электростанций в условиях неблагоприятной электромагнитной обстановки // Технологии электромагнитной совместимости. - 2014. - №1/2(48). - С. 32-35.

34. Щепетов А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств: В 3-х частях: Часть 2. Расчет измерительных устройств. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2007. – 344с.

35. Аш Ж. с соавторами. Датчики измерительных систем: В 2-х книгах. Кн.2. Пер. с франц. – М.: Мир, 1992. - 424с., ил.

36. Никонов К.П., Орлов В.П. Использование системы компьютерного моделирования matlab при проектировании датчика давления. Электронный журнал «Труды МАИ». № 61, 2012 г;

37. Хансуваров К.И., Цейтлин В.Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. – М.: Издательство стандартов, 1990. 287с., ил.

38. Endress & Hauser. Преобразователь давления Cerabar S PMC 71/72/75, преобразователь давления Cerabar S PMC 71/72/75. Техническая информация TI383P/00/ru. 2011-68с.

39. Endress & Hauser. Ceraphant T PTC31, RTP31, RTP35. Реле давления для измерения и мониторинга относительного и абсолютного давления. Техническая информация TI384P/00/ru. 2005-24с.

40. Ушков А.В. Разработка конструктивно – технологических методов производства кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной

стойкостью к перегрузкам. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2008 г. – 160с.

41. A generic interface chip for capacitive sensors in low-power multi-parameter microsystems / N. Yazdi, A. Mason, K. Najafi, K.D. Wise // Sensors and Actuators A. – 2000. – №84. – P. 351-361.

42. U.S. Patent 5009108, Int. Cl. G01L, 11/00. Vibrating Type Transducer. – 1991.

43. Проектирование датчиков для измерения механических величин / Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с., ил.

44. Кравченко В.Н. DPНагp – Современные технологии в измерениях давления, расхода и уровня // Законодательная и прикладная метрология (М.). – 2006. – №3. – С. 33-36.

45. Гончаров А.И. Датчики давления EJA производства фирмы «YOKOGAWA ELECTRIC CORPORATION», Япония // Законодательная и прикладная метрология (М.).- 1996.-№5.-С. 41-46.

46. Yokogawa Electric Corporation. Model EJA430A Gauge Pressure Transmitter. General Specifications GS 01C21E01-00E, 2002-9с.

47. Yokogawa Electric Corporation. Model EJA530A/НАС Gauge Pressure Transmitter (High Accuracy Type). General Specifications GS 01C21F01-02E, 2002-8с.

48. Ваганов В.И. Интегральные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 138 с., ил.

49. BSM Sensor, Model 315M Metal Capacitive Differential Pressure Modules, 2011-3с.

50. Свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.C.30.004.A №43532 на датчик давления ТЖИУ406-М100-АС. 2011. – 6с.

51. Щепетов А.Г. Теория, расчет и проектирование измерительных устройств: В 2-х частях: Часть 1. Теория измерительных устройств. – М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2006. – 248с.

52. В. А. Боднер, А. В. Алферов. Измерительные приборы. В 2 томах. - М.: Изд-во стандартов, 1986. 800с.
53. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. –М., Машгиз, 1962. 459 с., ил.
54. Грейм И.А. Элементы проектирования и расчет механизмов приборов/ Учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Приборы точной механики». -Л.: Машиностроение, 1977. - 216 с.
55. PICOCAP. Capacitance – to – Digital Converter PS021. Capacitance measurement datasheet. Acam mess electronic. 2007. – 40с.
56. Браславский Д.А. Приборы и датчики летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1970. - 392 с.
57. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990.- 624 с
58. 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.
59. Топильский В.Б. Схемотехника измерительных устройств. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 232 с.: ил.
60. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 7-е. – М.: Мир, БИНОМ, 2011. – 704 с, ил.
61. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.
62. Mentor Graphic. ExpeditionTM PCB User's Guide, 2005. 480с.
63. Никонов К.П. Расчет в среде SolidWorks механических воздействие на датчик давления для испытательного оборудования авиационной техники. Электронный журнал «Труды МАИ». № 70, 2013 г.

64. Никонов К.П. Исследование теплового режима датчика давления в САПР SolidWorks. Журнал «Научно-технический вестник Поволжья». № 3, 2014. с 173-176.
65. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005.- 560с.
66. Парфенов Е.М. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е.М. Парфенов, Э.Н.Камышная, В.П. Усачев. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.: ил.
67. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М.:ДМК Пресс, 2010. 464с., ил. (Серия «Проектирование»).
68. MMU 0102, MMA0204, MMB 0207 – Professional MELF resistors. Vishay Beyschlag. 2004. – 10с.
69. SIPMOS[®] Small-Signal-Transistor BSP129. Infineon technologies, 2005. - 9с.
70. Data sheet thin film chip resistors. General purpose. RJ series. YAGEO. 2008. – 9с.
71. RLB series radial inductors. Bourns. 2010 – 7с.
72. Termal Images Ti9, Ti10, Ti25, TiRx, TiR and TiR1 Руководство пользователя. Fluke Corporation. 2007. – 25с.
73. Никонов К.П., Никонова П.В. Патент на полезную модель №132551 «Датчик давления» от 20 сентября 2013 г.

Приложение А. Приложение к главе 1

Таблица А.1 – САПР для разработки моделей и алгоритмов синтеза и анализа проектных решений ЭУ

№	Этап проектирования	Тип САПР	Название САПР	Основные функции
1	Системно-технический	Системы компьютерной математики и моделирования	Matlab, MathCad, VisSim и др.	Разработка моделей функционирования ДД или его блока
2	Функциональный	ЕСАD	Synopsys, Cadence Design Systems, Mentor Graphics и др.	Проектирование СБИС
			PSpice, ICAP/4Window, Saber Mixed-technology Simulator, Multisym (National Instruments), TINA (Texas Instrumenst) и др.	Разработка моделей электронных схем
			Mentor Graphics, Altium Designer, Altium P-CAD, Cadence Orcad, ISE WebPACK Design, Quarus II и др.	Разработка электрических принципиальных схем
3	Программно-алгоритмический	ЕСАD, среды разработки и отладки программного обеспечения	IAR Embedded Workbench, Keil Embedded Development Tools, Code Composer Studio и др.	Разработка ПО для микроконтроллеров, моделирование работы проекта
			ISE WebPACK Design, Quarus II, Atmel Studio IDE и др.	Разработка ПО для ПЛИС, моделирование работы проекта
4	Конструкторский	ЕСАD/МСАD	Mentor Graphics, Altium Designer, Altium P-CAD, Cadence Orcad и др.	Разработка конструкции ПЛП, разработка КД
			Unigraphics, CATIA, Pro/Engineer, Solid Works, Компас	Разработка несущих конструкций
5	Технологический	ЕСАD/МСАD	Mentor Graphics, Altium Designer, Altium P-CAD, Unigraphics, CATIA, Pro/Engineer, Solid Works, Компас, T-Flex CAD и др.	Технологическая подготовка производства, разработка ТП

Таблица А.2 – Требования к датчикам давления по величине измеряемого давления и точности измерения.

№	Параметр		Величина
1	Верхние пределы давления	Разности	0,06 кПа ... 16 МПа
		Избыточного	0,06 кПа ... 1000 МПа
		Абсолютного	1 кПа ... 16 МПа
		Разрежения	0,06 ... 100 кПа
		Давления-разрежения	верхний предел измерения разрежения 0,05...100 кПа; верхний предел измерения давления от 0,05 до 2,4 МПа;
	Нижние пределы давления	Разности	0 кПа
		Избыточного	
		Абсолютного	
		Разрежения	-0,05 ... - 100 кПа
	Давления-разрежения		
2	Пределы допускаемой основной погрешности, % ВПИ ¹⁾ или % ДИ ²⁾		$\pm 0,05; \pm 0,1; \pm 0,15; \pm 0,16; \pm 0,2; \pm 0,25; \pm 0,4; \pm 0,5; \pm 0,6; \pm 1,0; \pm 1,5$
3	Дополнительная погрешность, вызванная изменением температуры окружающего воздуха на каждые 10 °С, % ВПИ или % ДИ		$\pm 0,1; \pm 0,15; \pm 0,16; \pm 0,2; \pm 0,25; \pm 0,35; \pm 0,45; \pm 0,50; \pm 0,60; \pm 0,75$ в соответствии с допускаемой основной погрешностью
4	Время установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемой величины, составляющем 90% диапазона измерений, мс		От 1
¹⁾ ВПИ – верхний предел измерения ²⁾ ДИ – диапазон измерения			

Таблица А.3 – ВВФ для датчиков давления.

№	Вид ВВФ		Величина	
1	Температура окружающего воздуха, °С		- 60... +200	
2	Верхнее значение относительной влажности, %	Минимум	20 при 30°С и более низких температурах, без конденсации влаги	
		Максимум	100 при 40°С и более низких температурах, с конденсацией влаги	
3	Случайная широкополосная вибрация	Частота, Гц	1...7000	
		Среднеквадратичное значения ускорения, м/с ² (g)	2...490 (0,2...50)	
4	Синусоидальные вибрации	Частота, Гц	0,1...2000	
		Амплитуда смещения, мм	0,015...10	
		Амплитуда ускорения, м/с ² (g)	1,96...100 (0,1...10)	
5	Многokrатные механические удары	Пиковое ускорение, м/с ² (g)	100...1500 (10...150)	
		Длительность импульса, мс	2...50	
		Число ударов в минуту	15...80	
		Общее число ударов	12000	
6	Одиночные механические удары	Пиковое ускорение, м/с ² (g)	20...30000 (0,2...3000)	
		Длительность импульса, мс	0,2...30	
		Число ударов в минуту	15	
		Общее число ударов	60	
7	Линейное ускорение, м/с ² (g)		150 (15)	
8	Атмосферное давление, кПа		0,67...106,7	
9	Акустические шумы	Частота, Гц	50...10000	
		Уровень, дБ	170	
10	Солнечное излучение	Плотность потока, Вт/м ²	Интегральная	1120
			Ультрафиолетового излучения	68
11	Выпадающие осадки (дождь), мм/мин		15	
12	Соляной (морской) туман, г/м ³		3	
13	Поток пыли (песка)	Концентрация, г/м ³	5±2	
		Скорость воздуха, м/с	15	
14	Агрессивные среды	сернистый газ	Концентрация, мг/м ³	2,0
		Сероводород		1,0
		Аммиак		1,0
		двуокись азота		2,0
		Озон		0,1
15	Мощность поглощенной дозы, Гр/с		2,78·10 ⁻⁴	
16	Объемная активность, Бк/ м ³		7,4·10 ⁷	

Таблица А.4 – Требования надежности, предъявляемые к ДД.

№	Наименование	Значение
1	Средняя наработка на отказ, ч	65000, 80000, 100000, 125000, 150000, 200000, 250000, 320000
2	Средний срок службы, лет	4, 8, 12, 14, 15, 20

Таблица А.5 – Выходные сигналы датчиков давлений.

№	Вид сигнала	Реализация сигнала
1	Аналоговый	Токовые сигналы и сигналы напряжения постоянного тока: 0-5; 0-20; 4-20 мА; 0-10; 0-5; 0-1 В
2	Цифровой	Цифровые полевые шины (последовательные линии связи RS-485, RS-422, RS-232, а также сети TCP/IP): 1. MODBUS; 2. FOUNDATION Fieldbus; 3. PROFIBUS и др.
		CAN (Controller Area Network - сеть контроллеров)
		HART (Highway Addressable Remote Transducer) используется для дистанционного обмена цифровыми данными с датчиком давления по аналоговой линии связи типа «токовая петля» с выходным сигналом 4-20 мА
		Беспроводные радиоканалы и сети

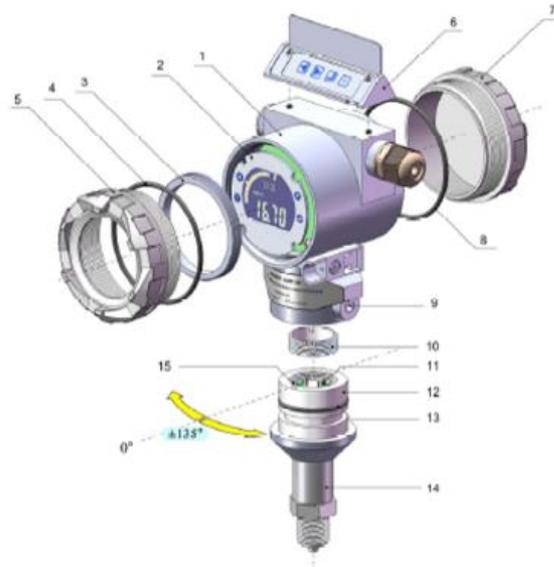


Рисунок А.1 – Конструкция датчика давления Элемер-АИР-30

Обозначения на рисунке А.1.: 1– корпус электронного блока; 2– панель индикатора; 3– прижимное кольцо; 4– уплотнительное кольцо передней крышки; 5– передняя крышка; 6– наружный блок управления; 7– задняя крышка; 8– уплотнительное кольцо задней крышки; 9– стопорный винт; 10– прижимное кольцо модуля сенсора; 11– разъем модуля сенсора; 12– переходное цилиндрическое устройство; 13– уплотнительное кольцо; 14– корпус сенсорного блока; 15– штифт ограничения угла поворота.

Данная конструкция описана в [30]. К недостаткам можно отнести: сложность изготовления и относительную дороговизну.

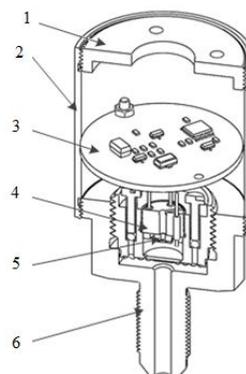


Рисунок А.2 – Конструкция измерительного преобразователя давления

1 – крышка электронного блока; 2– корпус электронного блока; 3– электронный блок; 4– гермоввод; 5– чувствительный элемент; 6– штуцер.

С измеряемой средой ДД соединяется с помощью штуцера 6. Корпус электронного блока 2 обеспечивает герметизацию электронного блока 3. Чувствительный элемент 5 отделен от измеряемой среды металлической мембраной, обеспечивающей защиту от агрессивных сред, и соединен с микропроцессорной схемой через гермоввод 4. Достоинствами такой конструкции являются небольшие масса и габариты, простота изготовления, дешевизна. Недостатки - отсутствует индикатор для отображения измеряемого давления, исполнение с видом взрывозащиты «взрывонепроницаемая оболочка “d”» вызовет существенное увеличение массы и габаритов корпуса электронного блока 2.



Рисунок А.3 – ДД с емкостной ячейкой Cerabar S PMC71 (а), Ceraphant T PTC31 (б), производитель Endress & Hauser, Германия

Эти ДД имеют малую основную погрешность измерения до $\pm 0,05\%$, долговременной стабильность характеристик, высокой рабочей температурой до 400°C , перестройка диапазонов 100:1, могут быть настроены на месте установки с помощью меню через выходной сигнал 4...20 мА с помощью HART протокола, или через протоколы PROFIBUS PA, FOUNDATION Fieldbus [38,39].



а)



б)

Рисунок А.4 – ДД с вибрационно-частотным первичным преобразователем EJX430 (а), EJA530 (б) производитель Yokogawa, Япония

Основная погрешность измерения этих датчиков до $\pm 0,065\%$ от верхнего предела измерений (ВПИ), стабильность характеристик $0,1\%$ от верхней границы диапазона измерения в течении 60 месяцев, температура окружающей среды от -40 до $+85$ °С, настройки могут быть дистанционно изменены через выходной сигнал $4...20$ мА с помощью HART или BRAIN протоколов, обладают защитной оболочкой типа IP67 [46,47].

Таблица А.5 – Достоинства и недостатки первичных преобразователей давления.

Достоинства	Недостатки
Дифференциально-емкостной	
1. Высокая чувствительность (возможность измерять давления от сотых долей кПа); 2. Защита от воздействия перегрузок по давлению; 3. Высокая стабильность характеристик; 4. Высокая собственная частота	1. Сложная электрическая схема преобразования емкостного сигнала.
Вибрационно-частотный (Н - образный)	
1. Высокая точность преобразования; 2. Длительная временная стабильность метрологических характеристик; 3. Незначительное влияние гистерезисных эффектов; 4. Незначительное влияние статического давления; 5. Возможность одновременного измерения дифференциального и статического давления; 6. Высокая чувствительность; 7. Выходной сигнал может быть считан непосредственно микропроцессорным устройством.	1. Сложная технология изготовления 2. Высокая стоимость
Вибрационно-частотный (цилиндрический резонатор)	
1. Отсутствие предварительного преобразователя давления в величину, непосредственно влияющую на выходной сигнал. 2. Высокая точность; 3. Широкий диапазон измерения.	1. Изменение собственной частоты колебаний при загрязнении измеряемой среды; 2. Чувствительность к внешним вибрациям и ударам.
Вибрационно-частотный (кварцевый резонатор)	
1. Высокая разрешающая способность; 2. Долговременная стабильность кварца; 3. Широкий диапазон рабочих температур; 4. Низкое энергопотребление.	1. Не способны выдерживать перегрузки по давлению.

Продолжение таблицы А.5

Тензометрический (КНС-преобразователи)	
1. Налаженное серийное производство; 2. Низкая стоимость; 3. Защищенность чувствительного элемента от воздействия агрессивной среды.	1. Неустраняемая временная нестабильность метрологических характеристик; 2. Высокая температурная зависимость; 3. Гистерезис по давлению и температуре; 4. Низкий коэффициент чувствительности.
Тензометрический (КНК-преобразователи)	
1. Высокая стабильность метрологических характеристик; 2. Высокая точность; 3. Низкая стоимость; 4. Защищенность чувствительного элемента от агрессивной среды.	1. Высокая температурная зависимость; 2. Ограничение по температуре (до 150°C); 3. Низкий коэффициент чувствительности.
Индуктивный и индукционный	
1. Простая конструкция, малые габариты и масса; 2. Малая инерционность; 3. Незначительная температурная зависимость; 4. Малая нелинейность; 5. Возможность измерения низких и дифференциальных давлений. 6. Высокая радиационная стойкость.	1. Чувствительность к магнитным воздействиям.
Ионизационный	
1. Возможность регистрировать низкое давление – вплоть до глубокого вакуума.	1. Нет возможности эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному; 2. Зависимость выходного сигнала от давления является не линейной, а логарифмической; 3. Высокая относительная погрешность
Пьезоэлектрический	
1. Измерение быстроменяющегося давления; 2. Низкая стоимость; 3. Простота конструкции и изготовления; 4. Высокая стойкость к воздействию температуры и влажности.	1. Нет возможности измерять статическое давление; 2. Невысокий уровень выходного сигнала; 3. Не способны выдерживать перегрузки по давлению.

Приложение Б. Приложение к главе 2

Б.1. Система уравнений, составленная в соответствии с условиями равномерного приближения (2.18) и (2.19).

$$\Delta_1 = q_6 \cdot \left(q_2 \cdot \Delta P_{\text{мин}} + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P_{\text{мин}}} \right) - \frac{25000}{6} \cdot \Delta P_{\text{мин}}$$

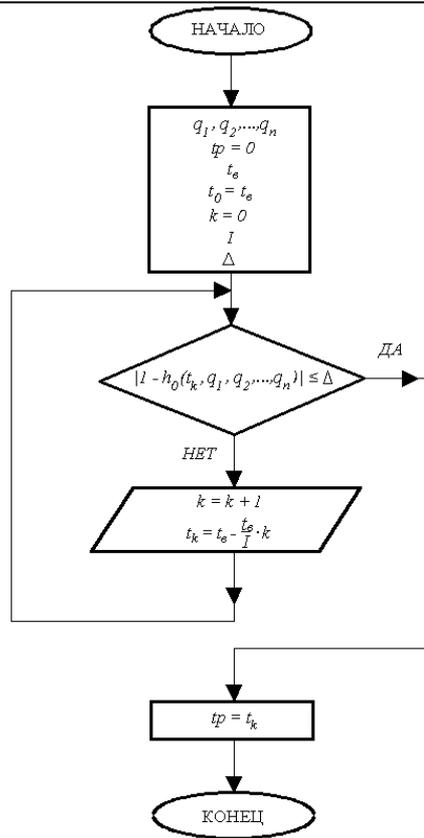
$$\Delta_2 = q_6 \cdot \left(q_2 \cdot \Delta P_1 + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P_1} \right) - \frac{25000}{6} \cdot \Delta P_1$$

$$\Delta_3 = q_6 \cdot \left(q_2 \cdot \Delta P_2 + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P_2} \right) - \frac{25000}{6} \cdot \Delta P_2$$

$$\Delta_4 = q_6 \cdot \left(q_2 \cdot \Delta P_{\text{макс}} + \sqrt[3]{q_1 \cdot \Delta P_{\text{макс}}} \right) - \frac{25000}{6} \cdot \Delta P_{\text{макс}}$$

$$S_1 = q_3 \cdot \left(q_2 + \frac{1}{3 \cdot (q_1 \cdot \Delta P_1)^{\frac{2}{3}}} \cdot q_1 \right) - \frac{12500}{3} = 0$$

$$S_2 = q_3 \cdot \left(q_2 + \frac{1}{3 \cdot (q_1 \cdot \Delta P_2)^{\frac{2}{3}}} \cdot q_1 \right) - \frac{12500}{3} = 0$$



```

1 float q1, q2, qn;
2 float tp=0;
3 float tv, t=tv;
4 float delta;
5 int k=0, I;
6
7 while (|1-h0(t,q1,q2,qn)| <=delta)
8 {
9   k=k+1;
10  t=tv-((tv/I)*k);
11 }
12 tp=t;
  
```

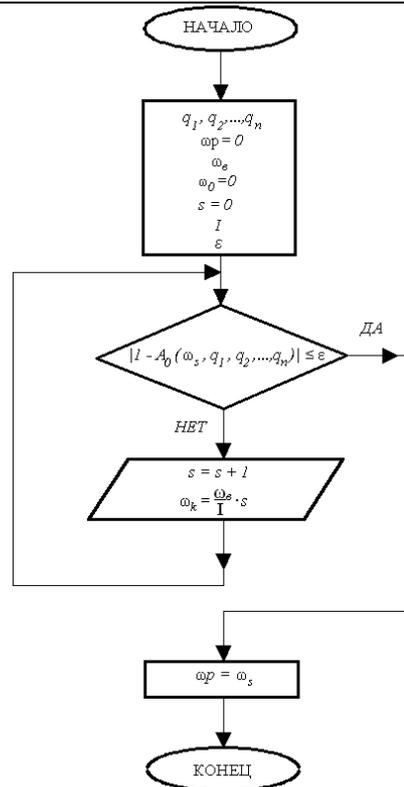
Программный код Matlab

$$\begin{array}{l}
 \text{tp}(q_1, q_2, \dots, q_n) := \left\{ \begin{array}{l}
 k \leftarrow 0 \\
 t_0 \leftarrow t_v \\
 \text{while } |1 - h(q_1, q_2, \dots, q_n)| \leq \Delta \\
 \quad \left\{ \begin{array}{l}
 k \leftarrow k + 1 \\
 t_k \leftarrow t_v - \frac{t_v}{I} \cdot k
 \end{array} \right.
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

Программный код MathCAD

Рисунок Б.2 Схема алгоритма расчета ДПП в САПР Matlab и MathCAD

На рисунке Б.2 Δ - допустимое значение относительной переходной погрешности, t_v - ожидаемое максимальное значение длительности переходного процесса, I - число, влияющее на точность расчета. При обращении к этой функции интервал наблюдения $0 \leq t \leq t_v$ разбивается на I точек $t_k = t_v - (t_v/I) \cdot k$ и в каждой из них, начиная с точки t_v , последовательно вычисляется значение модуля относительной переходной погрешности $|\Delta(t_k)| = |1 - h_0(t_k; q_1, q_2, \dots, q_n)|$. Как только нарушается условие $|\Delta_d| \leq \Delta$, величина t_k присваивается переменной tp . По завершению расчетов определяется абсцисса точки первого выхода графика относительной переходной функции за границы трубки точности $1 \pm \Delta$, т.е. находится искомая ДПП для заданного сочетания значений варьируемых параметров датчика давления q_1, q_2, \dots, q_n .



```

1 float q1, q2, qn;
2 float wp=0, w=0;
3 float wv;
4 float eps;
5 int s=0, I;
6
7 while (|1-A0(w, q1, q2, qn)| <=eps)
8 {
9   s=s+1;
10  w=(wv/I)*s;
11 }
12 wp=w;
  
```

Программный код в Matlab

$$\omega_p(a1, a2, \varepsilon) := \left| \begin{array}{l} s \leftarrow 0 \\ \omega_0 \leftarrow 0 \\ \text{while } |1 - A(\omega_s, a1, a2)| \leq \varepsilon \\ \left| \begin{array}{l} s \leftarrow s + 1 \\ \omega_s \leftarrow \frac{\omega_v}{I} \cdot s \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Программный код в MathCAD

Рисунок Б.3 Схема алгоритма расчета ширины ППЧ в Matlab и MathCAD

На рисунке Б.3 ε - допустимое значение относительной частотной погрешности, ω_v - ожидаемое максимальное значение полосы пропускания частот, I - число, влияющее на точность расчета. При использовании этого

алгоритма интервал наблюдения $0 \leq \omega \leq \omega_B$ разбивается на $I+1$ точек $w_s = (\omega_B/I) \cdot s$, где $s = 0, 1, \dots, I$ и в каждой из них последовательно вычисляется величина модуля относительной частотной погрешности $|\Delta_\varepsilon(w_s)| = |1 - A_0(w_s, q_1, q_2, \dots, q_n)|$. Как только нарушается условие $|\Delta_\varepsilon| \leq \varepsilon$, значение переменной w_s присваивается переменной ω_p . Точность расчета зависит от величины шага $\Delta\omega = \omega_B/I$ и регулируется изменением числа I - чем больше это число, тем выше точность расчета. По завершению расчетов определяется абсцисса точки первого выхода этого графика за границы «трубки точности» $1 \pm \varepsilon$, т.е. искомая верхняя граница полосы пропускания частот ω_{II} для заданного набора варьируемых параметров датчика давления q_0, q_1, \dots, q_n . Если в результате расчета получено число $\omega_p = \omega_B$, то следует увеличить ожидаемое максимальное значение ширины ППЧ ω_B .

Приложение В. Приложение к главе 3

В.1 Принцип работы, технические характеристики и функциональная схема АЦП PS021 фирмы АСАМ (Германия).

Микросхема имеет возможность измерять широкий диапазон емкостей от 0 фФ до десятков нФ, обладает высокой скоростью измерения до 50 кГц, минимально возможное потребление 10 мкА при частоте измерения 10 Гц [49]. На рисунке В.1 представлена функциональная блок-схема АЦП PS021 для измерения емкости.

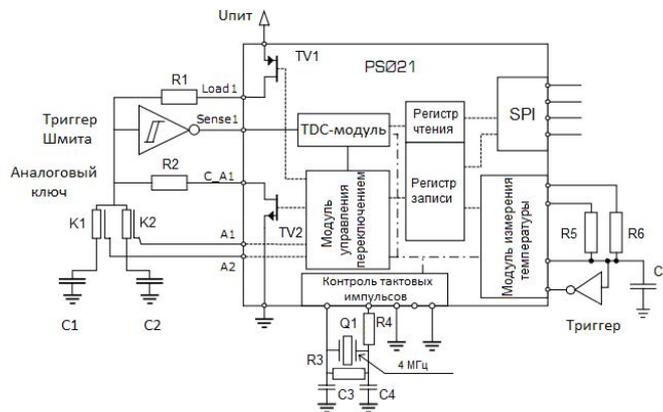


Рисунок В.1 – Функциональная схема микросхемы PS021

Принцип работы АЦП PS021: модуль управления переключением замыкает аналоговый ключ К1 и размыкает К2. Емкость С1 между измерительной мембраной и одним из электродов емкостного первичного преобразователя заряжается через резистор R1 до напряжения $U_{\text{конд}}$. При достижении порогового значения $U_{\text{конд}}$ триггер Шмита изменяет своё состояние. TDC-модуль подсчитывает количество тактовых импульсов заряда конденсатора, а затем модуль управления переключением закрывает транзистор TV1 и открывает транзистор TV2. Емкость С2 начинает разряжаться через резистор R2 до напряжения изменения состояния триггера Шмита $U_{\text{триг}}$. TDC-модуль подсчитывает количество тактовых импульсов разряда конденсатора, а затем модуль управления переключением размыкает аналоговый ключ К1 и замыкает К2. Далее осуществляется подсчет количества тактовых импульсов за время заряда и разряда емкости С2 между измерительной мембраной и другим

электродом емкостного первичного преобразователя. Для получения одного измерения емкостей $C1$ и $C2$ производится 8 таких циклов (рисунок В.2).

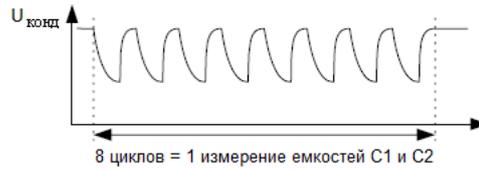


Рисунок В.2 – Единичное измерение емкостей $C1$ и $C2$

Затем выполняется указанное пользователем в настраиваемых регистрах записи определенное число измерений емкостей $C1$ и $C2$ (рисунок В.3).

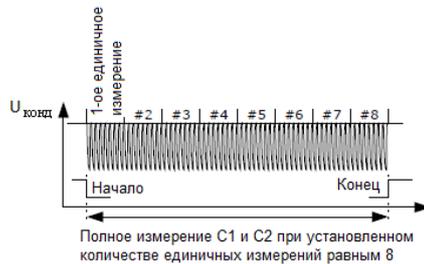


Рисунок В.3 – Полный цикл измерения емкостей $C1$ и $C2$

Для наиболее точного измерения желательно, чтобы длительность разряда емкостей была в пределах от 4 до 10 мкс [49].

Таблица В.1 – Рассеиваемая мощность основных тепловыделяющих элементов модуля отображения и ввода информации.

№	Позиционное обозначение	Тип элемента	Рассеиваемая мощность, Вт
1	HL1	Индикатор ЖК	0,003
2	VD1...VD6	Диод	0,00875
3	R1	Резистор	0,00582

Таблица В.2 – Рассеиваемая мощность основных тепловыделяющих элементов модуля электромагнитной совместимости.

№	Позиционное обозначение	Тип элемента	Рассеиваемая мощность, Вт
1	L1	Индуктивность	0,0075
2	L2-L5	Индуктивность	0,005
3	VD1	Диод	0,00125

Таблица В.3 – Рассеиваемая мощность основных тепловыделяющих элементов процессорного модуля обработки информации.

№	Позиционное обозначение	Тип элемента	Рассеиваемая мощность, Вт
1	D1	EEPROM	0,005
2	D2	Демультимплексер	0,001
3	D3	Инвертор	0,001
4	D4	Источник опорного напряжения	0,0105
5	D5	Регулятор напряжения	0,0075
6	D6	Супервизор	0,00341
7	D7	ЦАП	0,0071
8	D8	Микроконтроллер	0,0105
9	R1,R17,R16	Резистор	0,00525
10	T1	Трансформатор	0,0105
11	VD1	Диод	0,0055
12	VD2,VD3,VD4	Диод	0,0075
13	VT1	Транзистор	0,065
14	VT2	Транзистор	0,0064

Таблица В.4 – Рассеиваемая мощность основных тепловыделяющих элементов модуля обработки сигналов первичного преобразователя.

№	Позиционное обозначение	Тип элемента	Рассеиваемая мощность, Вт
1	D1	Аналоговый ключ	0,0065
2	D2, D3	Триггер Шмитта	0,001
3	D4	АЦП	0,00875
4	D5	Гальваноразвязка	0,00875
5	D6	Акселерометр	0,0027
6	D7	EEPROM	0,005
7	D7	ЦАП	0,0071
8	D8, D9	Триггер Шмитта	0,001
9	D10	Демультимплексер	0,001
10	R1-R9	Резистор	0,00525
11	VT1, VT2	Транзистор	0,0065

Приложение Г. Патент на полезную модель



Приложение Д. Акт о практическом применении результатов диссертационного исследования

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»



ВНИИА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ
ИМ. Н.Л. ДУХОВА»

✉ Моспочтамт, а/я 918, Москва, 101000

■ ул. Сущевская, д. 22, Москва,
127055

Тел.: (499) 978-78-03

Факс: (499) 978-09-03, 978-05-78

E-mail: vniia@vniia.ru

ОКПО 07623885, ОГРН 1027739646164

ИНН 7707074137, КПП 770701001

УТВЕРЖДАЮ

Главный конструктор

д.т.н., Г.А. Смирнов

2014



АКТ

18.08.2014 № А Т144/070-2014

о практическом применении результатов диссертационного исследования

Никонова Константина Петровича

Настоящий акт свидетельствует о том, что результаты диссертационной работы Никонова Константина Петровича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы при проектировании датчиков давления нового поколения во ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова.

Внедрение указанных результатов позволяет улучшить эксплуатационные характеристики датчиков давления, сократить длительности их разработки, а также снизить себестоимость.

Начальник научно - исследовательского отдела

Начальник научно - исследовательского отдела

Загузов
18.08.14.
Лысенко
18.08.2014

В.С. Загузов

А.А. Лысенко