

На правах рукописи



АБРАМОВ Сергей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ОСЕВЫХ
И РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ,
ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ
ТЕМПЕРАТУРЕ И ТЕРМОУДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**2.2.4 – Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины) (технические науки)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА – 2021

Работа выполнена на кафедре «Автоматика и телемеханика» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Маланин Владимир Павлович

Официальные оппоненты: **Боровик Сергей Юрьевич,**
доктор технических наук,
Институт проблем управления
сложными системами РАН – обособленное
подразделение ФГБУН Самарского
федерального исследовательского центра
РАН, директор;

Слесарев Юрий Николаевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
технологический университет»,
профессор кафедры «Автоматизация
и управление»

Ведущая организация – **НИКИРЭТ – филиал АО «ФНПЦ
«Производственное объединение «Старт»
имени М. В. Проценко»**

Защита состоится «__» _____ 2021 г. в ____ часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» и на сайте: http://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/abramov

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов Анатолий Вильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из основных требований, предъявляемых к средствам измерений, используемых в ракетно-космической технике, является высокая надежность. Это требование связано с повышением эффективности функционирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД), применяемых при запуске ракет-носителей. Контроль протекающих в ЖРД процессов осуществляют более 3000 средств измерений, которые измеряют такие физические параметры, как давление (избыточное, быстропеременное), температура, уровень топлива в баках, перемещение и ряд других.

Перспективным направлением повышения надежности ЖРД является проведение исследований работы датчиков при нестационарных температурах и термоударных воздействиях. Увеличение количества физических параметров, подлежащих контролю при работе ЖРД, также можно считать одним из важных путей решения проблемы повышения надежности.

Датчики осевых и радиальных перемещений (ДОиРП) устанавливаются в ТНА и измеряют перемещение валов ротора на протяжении всего цикла работы ЖРД. ДОиРП состоят из вихретокового датчика (ВД), фиксирующего само перемещение, и вторичного преобразователя (ВП), преобразующего измеренное перемещение в цифровой код. Эксплуатация ТНА происходит в захлаженном состоянии и сопровождается высокоскоростным обдувом жидким азотом с температурой минус 196 °С. Нестационарные температурные воздействия отрицательно сказываются на надежности и работоспособности как ТНА, так и ДОиРП. К контролируемым показателям надежности ТНА можно отнести вибрацию подшипников (вертикальную, поперечную, осевую), относительные перемещения элементов ротора и статора, а также бой ротора.

Большой вклад в теорию и практику измерения перемещений внесли научные коллективы, руководимые В. П. Базаевым, Ю. П. Батыревым, С. Ю. Боровиком, В. Г. Герасимовым, В. В. Ключевым, Ю. Н. Слесаревым, В. С. Соболевым, П. П. Чураковым, В. Е. Шатерниковым, В. М. Шляндиным, а также зарубежные ученые Ф. Шарп, Р. Хохшильд и др.

В последнее время ведутся серьезные научные исследования по работе ЖРД в условиях термоудара (без предварительного захлаживания). Это позволяет снизить объем используемого жидкого азота, необходимого для захлаживания, а также снизить время запуска ЖРД. При этом ДОиРП будет функционировать при термоударном воздействии, после чего ДОиРП будет эксплуатироваться в установившемся температурном режиме. Во время термоударного воздействия возникает значительная дополнительная температурная погрешность, достигающая 60 %, которую невозможно снизить при помощи известных конструктивных и технологических способов ввиду сложности описания протекающих процессов при термоударном воздействии. Поэтому перед автором стоит актуальная задача разработки методов и средств измерения перемещения при термоударном воздействии с применением математических моделей, снижении дополнительной температурной погрешности во время термоударного воздействия, а также улучшения метрологических характеристик ДОиРП при нестационарной температуре.

Цель диссертационной работы – расширение функциональных возможностей, снижение дополнительной температурной и методической погрешностей, увеличение чувствительности датчиков осевых и радиальных перемещений, эксплуатирующихся при нестационарной температуре и термоударных воздействиях.

Основные задачи исследования:

1 На основе проведенных экспериментов влияния термоудара на выходной сигнал датчика осевых и радиальных перемещений, а также с использованием разработанных математических моделей решить задачу снижения дополнительной температурной погрешности датчиков осевых и радиальных перемещений, эксплуатирующихся при термоударном воздействии.

2 Разработать методику снижения дополнительной температурной погрешности датчиков осевых и радиальных перемещений, которая при этом позволяет обеспечить высокоточное измерение перемещений во время термоударного воздействия.

3 На основе проведенного анализа и синтеза эквивалентных схем замещения, позволяющих проводить раздельное измерение информативных и неинформативных параметров схемы замещения, рассмотреть вопросы увеличения чувствительности и снижения дополнительной температурной и методической погрешностей датчиков осевых и радиальных перемещений, эксплуатирующихся при нестационарной температуре.

4 Разработать функциональную схему датчика осевых и радиальных перемещений, позволяющую измерять градиент температур между измерительной и компенсационной катушками вихретокового датчика.

Объектом исследования диссертационной работы являются датчики осевых и радиальных перемещений, основанные на вихретоковом принципе.

Предметом исследования являются разработанные схемно-технические способы снижения дополнительной температурной погрешности датчиков осевых и радиальных перемещений, эксплуатирующихся при термоударных воздействиях и нестационарной температуре.

Научная новизна работы:

1 Предложен способ уменьшения дополнительной температурной погрешности датчика осевых и радиальных перемещений при термоударном воздействии за счет применения разработанной методики снижения дополнительной температурной погрешности, отличающейся использованием разработанной математической модели, что позволило решить проблему измерения перемещений вала турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двигателя в режиме термоударного воздействия (п. 1 специальности 2.2.4 «Создание новых научных, технических и нормативно-технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции, связанных с измерениями механических величин»).

2 Решена задача увеличения чувствительности выходного сигнала датчика осевых и радиальных перемещений, снижения методической и дополнительной температурной погрешности датчика осевых и радиальных перемещений за счет использования модернизированной трехэлементной схемы замещения, позволившей проводить раздельное измерение информативных

и неинформативных параметров в режиме нестационарного температурного воздействия.

3 Предложена функциональная схема датчика осевых и радиальных перемещений, отличающаяся возможностью проводить определение градиента температур между измерительной и компенсационной катушками путем измерения падения напряжений на катушках, а также получать информацию о моменте времени переключения из режима «термоудар» в режим «нестационарная температура».

Практическая значимость работы. Предложенные в диссертации решения позволили снизить дополнительную температурную погрешность существующих приборов с 60,6 до 3,93 % в диапазоне отрицательных рабочих температур от (25 ± 10) °С до минус 196 °С при термоударном воздействии, а также повысить чувствительность на 26 %, снизить методическую погрешность на 45 % и дополнительную температурную погрешность в 1,72 раза при воздействии нестационарной температуры.

Работа обобщает теоретические и экспериментальные исследования, проведенные автором в АО «НИИФИ», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», способствует разработке методов и средств бесконтактного измерения смещения, применению моделирования при решении задач анализа и синтеза эквивалентных схем замещения вихретоковых датчиков, решению актуальной задачи снижения дополнительной температурной погрешности измерения при термоударных воздействиях.

На защиту выносятся:

1 Методика снижения дополнительной температурной погрешности при термоударном воздействии, основанная на вычислении скорректированного значения перемещения с применением математической модели, параметры которой определяются в процессе настройки значений импульсной переходной функции при термоударном воздействии.

2 Модернизированная схема замещения вихретокового датчика, представляющая собой параллельное соединение начальной индуктивности с последовательным соединением активных и реактивных вносимых сопротивлений, которая дала возможность проводить раздельное измерение информативных и неинформативных параметров схемы замещения и позволила существенно увеличить чувствительность выходного сигнала датчиков осевых и радиальных перемещений, а также снизить методическую и дополнительную температурную погрешность датчиков осевых и радиальных перемещений при воздействии нестационарной температуры.

3 Разработанная функциональная схема датчика осевых и радиальных перемещений, позволяющая на основе предложенной схемы замещения вихретоковых датчиков проводить измерение только информативных параметров с возможностью одновременной компенсации дополнительной температурной погрешности при термоударном воздействии.

Достоверность полученных результатов обеспечена совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также достоверностью полученных результатов с известными аналогами.

Реализация работы и внедрение результатов. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора использованы и внедрены в АО «НИИФИ» при разработке вихретоковых датчиков.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на девяти конференциях различного уровня: Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2012» (Москва, 2012); Международной научно-технической конференции «Шляндинские чтения – 2018» (Пенза, 2018); Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (Москва, 2013); Международной научно-технической конференции «Проблемы автоматизации и управления в технических системах» (Пенза, 2008, 2009, 2010, 2011); Международной научно-технической конференции «Датчики и системы» (Пенза, 2011, 2012).

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационных исследований изложены в 17 публикациях, из них 5 публикаций – в журналах из перечня ВАК РФ и 1 публикация в издании, индексируемом Scopus. По теме диссертационной работы получено 2 патента на изобретение.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, разработке экспериментальных и теоретических методов их решения, в обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов. Автор принимал непосредственное участие в разработке и испытаниях датчика осевых и радиальных перемещений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы с приложениями: 163 страницы, 34 рисунка, 19 таблиц. В приложениях представлены: код программного обеспечения в программе MathCAD, с использованием которого реализована методика снижения дополнительной температурной погрешности при воздействии термоудара, результаты экспериментальных исследований при термоударных воздействиях с различными температурами. Список литературы содержит 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основная цель и задачи исследования, приведена научная новизна и практическая ценность диссертационной работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена определению основных нерешенных проблем, стоящих перед разработчиками ЖРД при их включении. Проведен сравнительный анализ «холодного» (с предварительным захолаживанием элементов конструкции ТНА) и «горячего» (без предварительного захолаживания ТНА) запуска ЖРД, выявлены преимущества и недостатки. Доказано, что внедрение систем «горячего» запуска ЖРД является перспективным направлением, которое позволит существенно сократить общее время запуска ЖРД, значительно снизить перегрузки конструкции в момент воспламенения

топлива и уменьшить общую массу ЖРД ракет-носителей. Отмеченные преимущества особенно важны при многократном запуске ЖРД в полете.

При «горячем» запуске ВД, устанавливаемые в ТНА ЖРД, испытывают термоударное воздействие, во время которого дополнительная температурная погрешность достигает 60 %. Данная погрешность при контроле перемещений является неудовлетворительной; в соответствии с ОСТ 92-5069-88 дополнительная температурная погрешность в диапазоне рабочих температур не должна превышать 4 %.

Проведен сравнительный анализ технических и метрологических характеристик датчиков перемещений различных зарубежных и отечественных фирм. Определено, что наибольшими преимуществами по сравнению с другими обладают датчики перемещений производства АО «НИИФИ» благодаря высоким метрологическим характеристикам и расширенному температурному диапазону эксплуатации.

Также приведен анализ литературы, посвященной возможностям снижения дополнительной температурной погрешности при термоударных воздействиях. Рассмотрены три основных способа снижения дополнительной температурной погрешности – технологический, конструктивный и схемотехнический. Способы снижения дополнительной температурной погрешности основаны на оптимизации применяемых материалов в части подбора их коэффициентов линейного температурного расширения, на введении термоциклирования, на применении специальных технологий изготовления обмотки (например, заливка в пластмассу или эпоксидную смолу в вакууме с целью исключения воздушных включений) с использованием дополнительных опорных и компенсационных обмоток. Применение этих методов позволяет стабилизировать значение межвитковой емкости обмотки, а также смещение обмотки в целом под воздействием температуры.

Использование технологических и конструктивных способов, а также их комбинирование при разработке ВД не всегда эффективно из-за достижения предела их возможностей, обусловленного известными научно-техническими решениями. Аналоговые методы снижения дополнительной температурной погрешности в измерительных цепях, основанные на аналоговых схемотехнических решениях, не позволяют достичь высоких метрологических характеристик, поэтому в последние три десятилетия все шире применяются цифровые методы коррекции, выполняемые микроконтроллерами.

Для снижения температурной погрешности обычно применяют встроенный в корпус датчик температуры, полученные данные с которого используются для коррекции функции преобразования ДОиРП. Но в жестких условиях эксплуатации (от криогенных до +300 °С), а также при термоударных воздействиях его применение невозможно в силу резкого изменения градиента температур между измерительной и компенсационной катушками. Поэтому возникает актуальная задача разработки методики снижения дополнительной температурной погрешности и средств контроля температуры при измерении перемещения без использования температурных датчиков.

По результатам проведенного анализа установлено, что необходимость и актуальность продолжения глубоких научных исследований по этой теме

определяется наличием потенциальных возможностей снижения дополнительной температурной погрешности при термоударном воздействии.

Помимо термоударного воздействия, в диссертации уделяется большое внимание улучшению метрологических характеристик ДОиРП при нестационарной температуре, основанных на раздельном измерении информативных и неинформативных параметров схемы замещения ВД. Измерение только информативных параметров позволяет существенно повысить чувствительность выходного сигнала ДОиРП, снизить методическую и дополнительную температурную погрешность ДОиРП при нестационарной температуре.

Вторая глава посвящена исследованию влияния термоудара на выходной сигнал ДОиРП. Для этого проведены имитационное моделирование и натурные экспериментальные исследования. В процессе имитационного моделирования проводилось определение изменения температуры на обмотках ВД при воздействии термоудара. Имитационным моделированием с использованием программы конечно-элементного анализа Ansys построена объемная модель ВД, с использованием которой определяется температура на измерительной и компенсационной катушках во время термоудара в различные моменты времени. По результатам моделирования определено, что при термоударном воздействии с градиентом изменения температуры $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ выравнивание температур на измерительной и компенсационной катушке произойдет после 50 с. В процессе моделирования учитывались также влияние нагрева объекта контроля и нагрев присоединительного штуцера, в который частично отводится тепло.

Имитационная модель ВД приведена на рисунке 1.

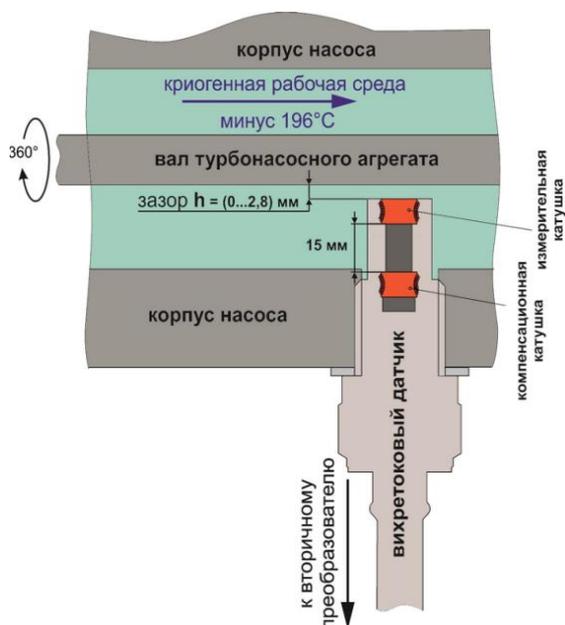


Рисунок 1 – Имитационная модель ВД с местом установки его на ТНА

Результаты моделирования показали, что при $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ температура на измерительной катушке в первую секунду примерно на $170\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ выше

температуры на компенсационной катушке, находящейся на расстоянии 15 мм от измерительной катушки в глубине корпуса ВД. Вследствие этого при термоударе на время длительностью до 50 с в выходном сигнале появляется ошибка измерения перемещения из-за последствий термоудара. По результатам натурального эксперимента определено, что при $T = -196\text{ }^{\circ}\text{C}$ в первые 5–7 с после начала термоудара наблюдается резкий скачок выходного сигнала. Далее температура на компенсационной катушке начинает постепенно приближаться к значению температуры на измерительной катушке, и выходной сигнал начинает экспоненциально снижаться до установившегося значения.

Выходной код с ВП, подлежащий коррекции при перемещениях h , равных 0,1; 1,5 и 2,8 мм, приведен на рисунке 2, где $fT_{\text{HKY}}(t)$ – стационарная температура рабочей среды (25 ± 10) $^{\circ}\text{C}$; $fT_{\text{TY}}(t)$ – температура при термоударном воздействии рабочей среды; выходной цифровой код с ВП при перемещениях h , равных 0,1; 1,5 и 2,8 мм: $fN_{\text{HKY}0,1}(t)$, $fN_{\text{HKY}1,5}(t)$, $fN_{\text{HKY}2,8}(t)$ – при стационарной температуре рабочей среды (25 ± 10) $^{\circ}\text{C}$; $fN_{\text{TY}0,1}(t)$, $fN_{\text{TY}1,5}(t)$, $fN_{\text{TY}2,8}(t)$ – при термоударном воздействии без коррекции; дополнительная температурная погрешность при перемещениях h , равных 0,1; 1,5 и 2,8 мм: $f\gamma_{\text{TY}0,1}(t)$, $f\gamma_{\text{TY}1,5}(t)$, $f\gamma_{\text{TY}2,8}(t)$ – при термоударном воздействии без коррекции.

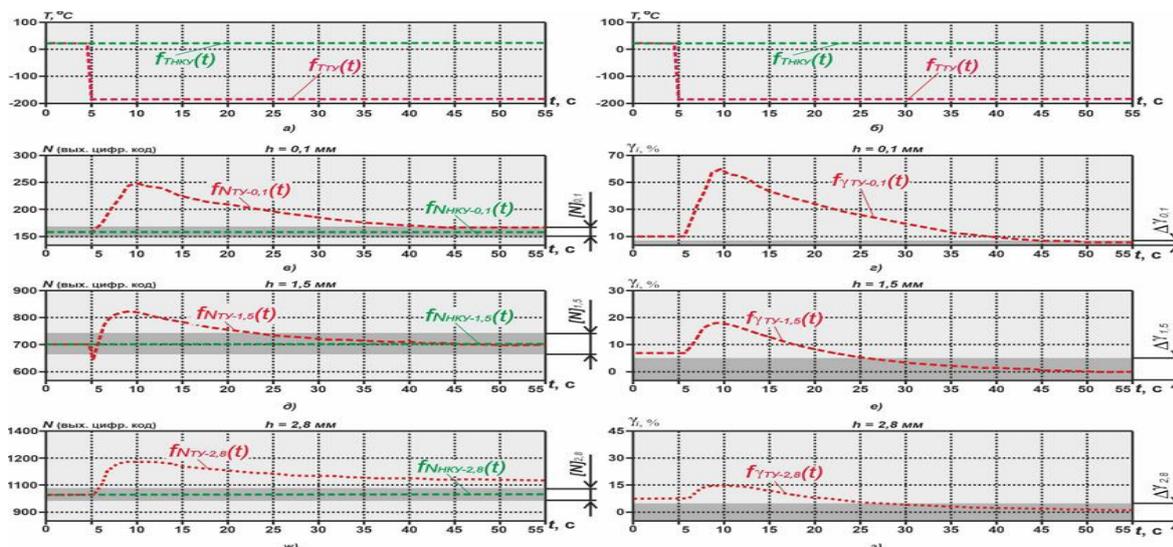


Рисунок 2 – Сигнал с ВП при различных перемещениях

Предлагаемая методика позволяет снижать дополнительную температурную погрешность в двух случаях:

- 1) выходной сигнал при термоударе начинает изменяться при любом перемещении (из всего измеряемого диапазона перемещений), но при этом во время термоудара перемещение не изменяется;
- 2) выходной сигнал при термоударе начинает изменяться при любом перемещении (из всего измеряемого диапазона перемещений), но при этом во время термоудара перемещение может измениться в любой момент времени.

Для снижения дополнительной температурной погрешности разработана методика, включающая в себя последовательность следующих действий:

1) определяют с требуемой частотой дискретизации временную зависимость выходного сигнала при термоударном воздействии с изменениями, наиболее характерными для эксплуатации ВД;

2) определяют параметры математической модели процесса эксплуатации при термоударном воздействии, которая описывается уравнением вида:

$$x(k) = \sum_{l=0}^k g_1(k, l, m) N(l, m) + \sum_{l_1=0}^k \sum_{l_2=0}^{k-l_1} g_2(k, l_1, l_2, m) N(l_1, m) N(l_2, m), \quad (1)$$

где $k = 0, 1, \dots, 49$ – дискретные отсчеты времени в секундах наблюдения выходного сигнала, в течение которого происходят нелинейные процессы; $N(k, m)$ – код выходного сигнала, определяемого по разности выходных кодов $N(k, m) = N_{L_1}(k, m) - N_{L_2}(k, m)$ на измерительной L_1 и компенсационной L_2 катушках; $m = 0, 1, \dots, 5$ – режимы термоударных воздействий, для которых получены экспериментально значения выходных сигналов; $x(l)$ – входной сигнал, который равен значению перемещения в момент времени $l = 0, 1, \dots, k$ и не зависит от режима термоударного воздействия; $g_1(k, l, m)$ и $g_2(k, l_1, l_2, m)$ – параметрические ядра Вольтерра, подлежащие восстановлению, где $m = 1, 2, 3$ – параметр, определяющий режим термоударного воздействия;

3) определяют $G_1(z)z^{k-1}$ и $G_2(z)z^{k-1}$ решением системы уравнений

$$\begin{cases} X_1(z) = G_1(z)N_1(z) + G_2(z)N_1^2(z), \\ X_2(z) = G_1(z)N_2(z) + G_2(z)N_2^2(z), \end{cases} \quad (2)$$

где $N_1(z), N_2(z)$ – Z-преобразование значений выходного сигнала при термоударном воздействии; $X_1(z)$ и $X_2(z)$ – Z-преобразование значений входного сигнала без термоударного воздействия;

4) по формуле (1) определяют ядра Вольтерра $g_1(k, m)$, $g_2(k, m)$ на основе найденных $G_1(z, m)$, $G_2(z, m)$;

5) вычисляют значения импульсной переходной функции по формулам:

$$\begin{aligned} g_1(k, m) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\text{Br}} G_1(z) z^{k-1} dz, \\ g_2(k, m) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\text{Br}} G_2(z) z^{k-1} dz, \end{aligned} \quad (3)$$

где Br – контур Бромвича, который содержит все особые точки функции $G_1(z)z^{k-1}$; $G_2(z)z^{k-1}$.

При этом необходимо выполнение следующих условий:

$$g_1(k, l, m) = 0 \text{ при } k > l ,$$

$$g_2(k, l_1, l_2, m) = 0 \text{ при } k > l_1 + l_2 .$$

Z-преобразования $g_1(k, l, m, m_1)$ и $g_2(k, l_1, l_2, m, m_1)$ по переменной k удовлетворяют условиям:

$$Z_k[g_1(k, l, m)] = G_1(z, m)z^{-l}, Z_k[g_2(k, l_1, l_2, m)] = G_2(z, m)z^{-(l_1+l_2)}, \quad (4)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots, 49$;

б) значения $g_1(k, l, m)$, $g_2(k, l_1, l_2, m)$ преобразовывают в цифровой код и заносят в энергонезависимую память микроконтроллера;

7) в промежутках между экспериментальными значениями, функциональную зависимость кода выходного сигнала $N(k, T)$ от термоударного воздействия для заданного перемещения $x(k)$ в момент времени $k = 0, 1, \dots, 49$ определяют в виде линейного сплайна:

$$N(k, T) = \frac{N(k, T_{d_{i+1}}) - N(k, T_{d_i})}{T_{d_{i+1}} - T_{d_i}} T + N(k, T_{d_i}) - \frac{N(k, T_{d_{i+1}}) - N(k, T_{d_i})}{T_{d_{i+1}} - T_{d_i}} T_{d_i}, \quad i = 0, 1, \dots, 3,$$

при $T_{d_i} \leq T < T_{d_{i+1}}$; T_{d_i} – дискретные значения температуры;

8) для других температур (отличных от температуры минус 196 °С) необходимо повторить операции п. 3–6;

9) в диапазоне термоударных воздействий от минус 196 °С до плюс 200 °С с шагом 1 °С в диапазоне времени 50 с требуется занести в память для хранения 50×396 значений для каждого ядра $g_1(k, T_s)$ и $g_2(k, T_s)$;

10) в случае, если в определенный момент времени $k_0 > 0$ происходит изменение перемещения (при $k_0 = 0$ изменений не происходит), то измерение перемещения проводится по формуле с учетом сдвига:

$$x(k) = \sum_{l=0}^{k-k_0} g_1(k-l-k_0)y(l+k_0) + \sum_{l_1=0}^{k-k_0} \sum_{l_2=0}^{k-k_0} g_1(k-l_1-l_2-k_0)y(l_1+k_0)y(l_2+k_0) +$$

$$+ \sum_{l_1=0}^{k-k_0} \sum_{l_2=0}^{k-k_0} \sum_{l_3=0}^{k-k_0} g_2(k-l_1-l_2-k_0)y(l_1+k_0)y(l_2+k_0)y(l_3+k_0).$$

Результаты предложенного алгоритма приведены на рисунке 3, где $fT_{\text{HKY}}(t)$ – стационарная температура рабочей среды (25 ± 10) °С; $fT_{\text{TY}}(t)$ – температура при термоударном воздействии рабочей среды; выходной цифровой код с ВП при перемещениях h , равных 0,1; 1,5 и 2,8 мм: $fN_{\text{HKY}}0,1(t)$, $fN_{\text{HKY}}1,5(t)$, $fN_{\text{HKY}}2,8(t)$ – при стационарной температуре рабочей среды (25 ± 10) °С; $fN_{\text{TY}}0,1(t)$, $fN_{\text{TY}}1,5(t)$, $fN_{\text{TY}}2,8(t)$ – при термоударном воздействии без коррекции; $fN_{\text{СК}}0,1(t)$, $fN_{\text{СК}}1,5(t)$, $fN_{\text{СК}}2,8(t)$ – при термоударном

воздействии с коррекцией; дополнительная температурная погрешность при перемещениях h , равных 0,1; 1,5 и 2,8 мм: $f\gamma_{\text{ТУ}}0,1(t)$, $f\gamma_{\text{ТУ}}1,5(t)$, $f\gamma_{\text{ТУ}}2,8(t)$ – при термоударном воздействии без коррекции; $f\gamma_{\text{СК}}0,1(t)$, $f\gamma_{\text{СК}}1,5(t)$, $f\gamma_{\text{СК}}2,8(t)$ – при термоударном воздействии с коррекцией.

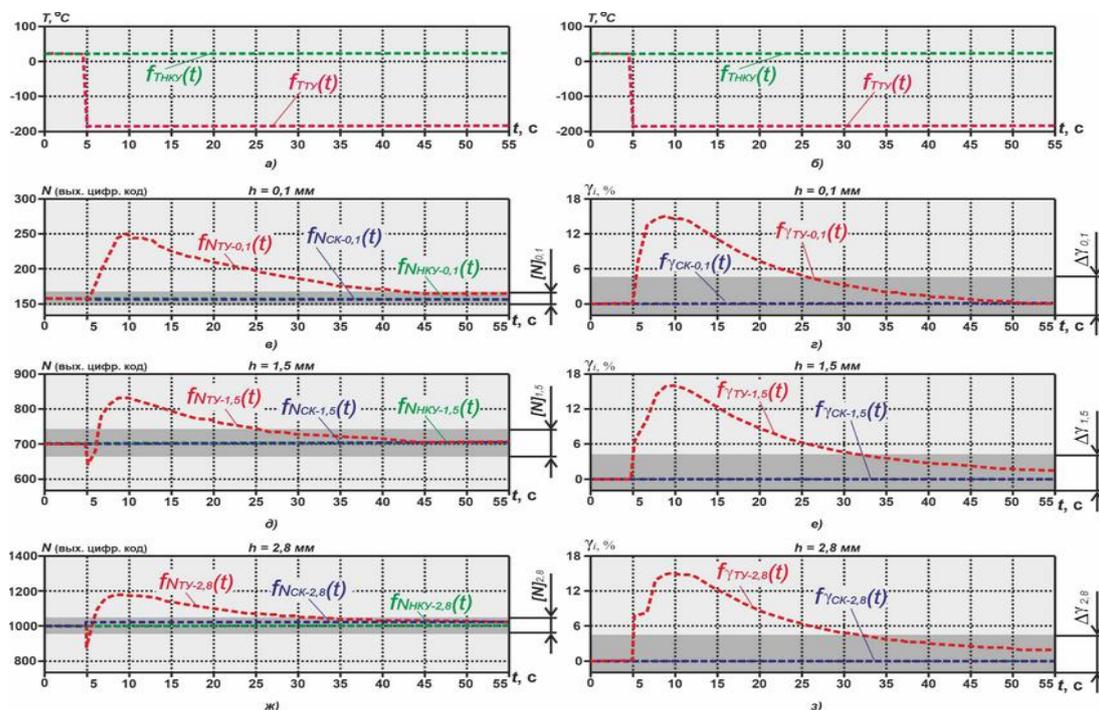


Рисунок 3 – Сигнал с ВП, подлежащий коррекции при перемещениях 0,1; 1,5; 2,8 мм и скорректированный сигнал с использованием ядер Вольтерра третьего порядка

Предложенная методика позволила снизить дополнительную температурную погрешность с 60,6 до $2,55 \cdot 10^{-6} \%$ в узловых точках.

Для проверки работоспособности предложенной модели автором проведена оценка снижения дополнительной температурной погрешности для перемещений $h = 0,4$ мм и $h = 2,2$ мм. Дополнительная температурная погрешность не превысила 3,82 %.

Результаты работы предлагаемой методики при изменяющемся перемещении во время термоудара представлены на рисунке 4, где $fT_h(t)$ – изменение перемещения во времени; $fT_{\text{НКУ}}(t)$ – стационарная температура рабочей среды; $fT_{\text{ТУ}}(t)$ – температура при термоударном воздействии рабочей среды; выходной цифровой код с ВП при перемещении $h = 0,1$ мм на интервале от 5 до 25 с: $fN_{\text{НКУ}}0,1(t)$ – при стационарной температуре рабочей среды $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$; $fN_{\text{ТУ}}0,1(t)$ – при термоударном воздействии рабочей среды без коррекции дополнительной температурной погрешности; $fN_{\text{СК}}0,1(t)$ – при термоударном воздействии рабочей среды с коррекцией дополнительной температурной погрешности; выходной цифровой код ВП при перемещении $h = 1,5$ мм на интервале от 25 до 45 с: $fN_{\text{НКУ}}1,5(t)$ – при стационарной темпе-

ратуре рабочей среды $(25 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$; $fN_{\text{ТУ}}1,5(t)$ – при термоударном воздействии рабочей среды без коррекции дополнительной температурной погрешности; $fN_{\text{СК}}1,5(t)$ – при термоударном воздействии рабочей среды с коррекцией дополнительной температурной погрешности; выходной цифровой код с ВП при перемещении $h = 2,8 \text{ мм}$ на интервале от 45 до 55 с: $fN_{\text{НКУ}}2,8(t)$ – при стационарной температуре рабочей среды $(25 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$; $fN_{\text{ТУ}}2,8(t)$ – при термоударном воздействии рабочей среды без коррекции дополнительной температурной погрешности; $fN_{\text{СК}}2,8(t)$ – при термоударном воздействии рабочей среды с коррекцией дополнительной температурной погрешности; $f\gamma(t)$ – дополнительная температурная погрешность без коррекции; $f\gamma_{\text{СК}}(t)$ – дополнительная температурная погрешность с коррекцией.

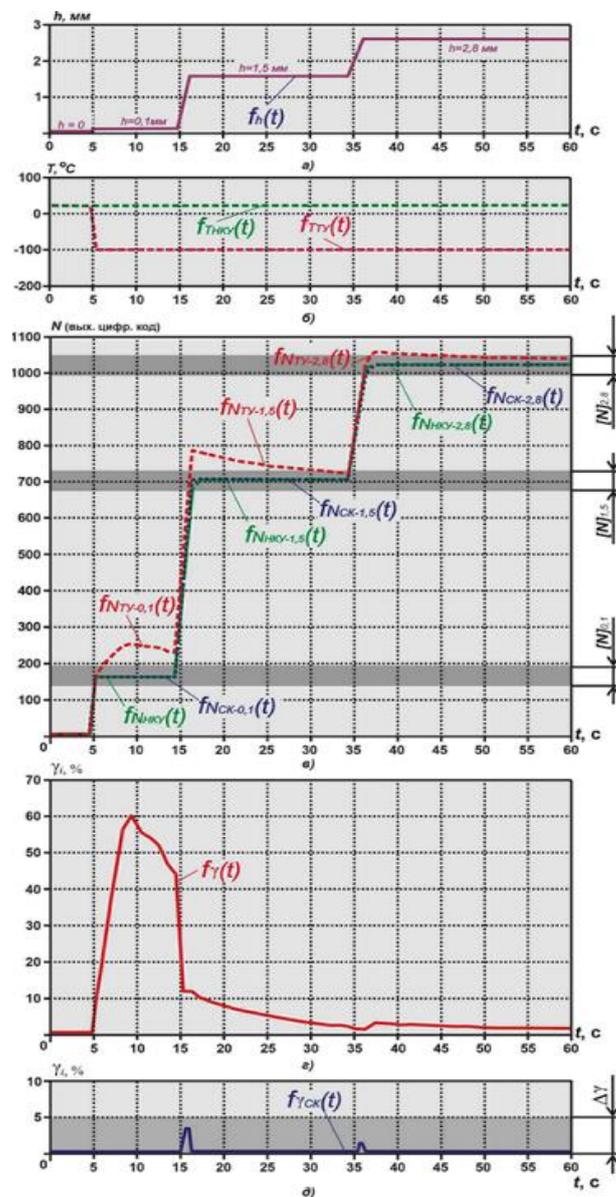


Рисунок 4 – Сигнал с ВП, подлежащий коррекции при изменяющихся перемещениях, и скорректированный сигнал с использованием разработанной методики коррекции

Дополнительная температурная погрешность при изменяющемся перемещении составляет 3,93 %.

Третья глава посвящена выбору конструкции ВД, позволяющей увеличить чувствительность, снизить методическую и дополнительную температурную погрешность ДОиРП, эксплуатирующихся при нестационарной температуре.

Проблема представления ВД удовлетворительной схемой замещения в виде многоэлементного двухполюсника особенно актуальна при решении вопросов повышения точности измерения и снижения дополнительной температурной погрешности. Одним из решений указанной задачи является представление схемы замещения в виде одно- или двухэлементного двухполюсника путем уменьшения влияния на результат измерения неинформативных параметров.

Изначально схема замещения ВД представлялась в виде последовательного соединения начальной индуктивности с активной и реактивной составляющей вносимого сопротивления, зависящего от измеряемого перемещения. Модуль полного вносимого сопротивления зависит от перемещения и составляет 30–40 % от значения модуля начального полного сопротивления катушки индуктивности.

Для отдельного измерения информативных и неинформативных параметров и, соответственно, увеличения чувствительности и снижения дополнительной температурной и методической погрешности измерения автором предложено синтезировать двухэлементную схему замещения ВД на основе экспериментально снятых амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) измерительной катушки, определенных в соответствии с рисунком 5, где УЗП – установка задания перемещения, G – генератор, ДН – делитель напряжения, PG – осциллограф, ИКИ ВД – измерительная катушка индуктивности вихревого датчика.

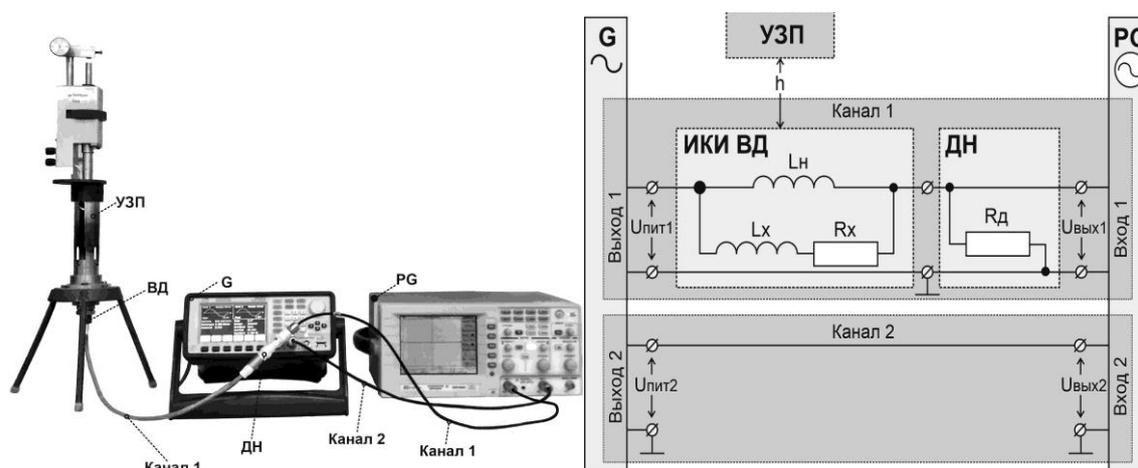
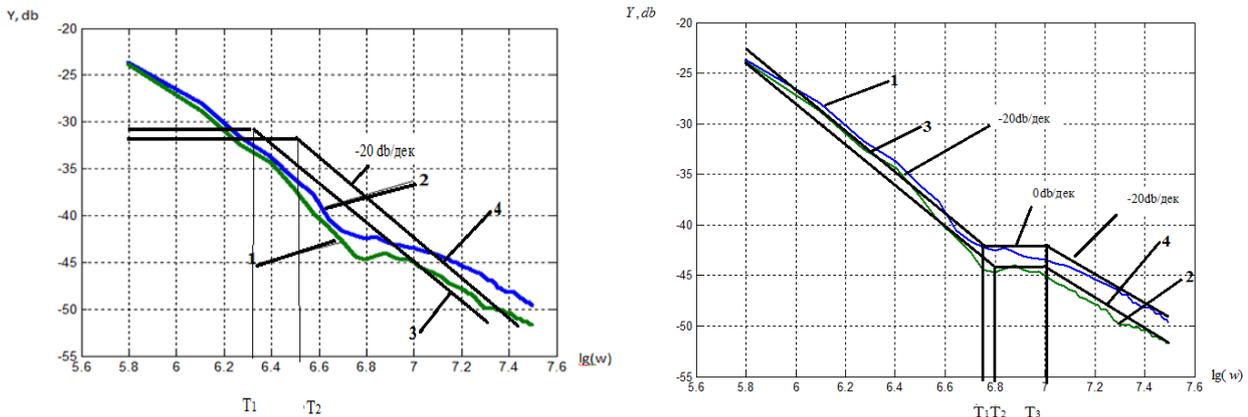


Рисунок 5 – Схема проведения эксперимента по определению АЧХ ВД

На рисунке 6,а приведены экспериментально определенные логарифмические АЧХ (ЛАЧХ) и аппроксимированные с наклоном 0 и –20 db/дек, что

соответствует двухэлементной схеме замещения (исходной); на рисунке 6,б представлены экспериментально определенные АЧХ и аппроксимированные с наклоном -20 , 0 и -20 db/дек, что соответствует трехэлементной схеме замещения (синтезированной). Синтез проводился исходя из условия максимального приближения экспериментальных данных и аппроксимирующих прямых. Трехэлементная схема замещения позволила осуществить преобразование только информативных параметров схемы замещения, что дало возможность повысить чувствительность выходного сигнала от измеряемого перемещения на 26 %, снизить методическую погрешность на 45 %.



а) кривые: 1 – $h = 0,1$ мм;
 2 – $h = 2,8$ мм; 3 – $h = 2,8$ мм;
 4 – $h = 0,1$ мм

б) кривые: 1 – $h = 2,8$ мм;
 2 – $h = 0,1$ мм; 3 – $h = 2,8$ мм;
 4 – $h = 0,1$ мм

Рисунок 6 – Экспериментально снятые и аппроксимированные ЛАЧХ по исходной схеме замещения (а) и для синтезированной схемы замещения (б)

Исходная и синтезированная схемы замещения ВД представлены на рисунке 7.

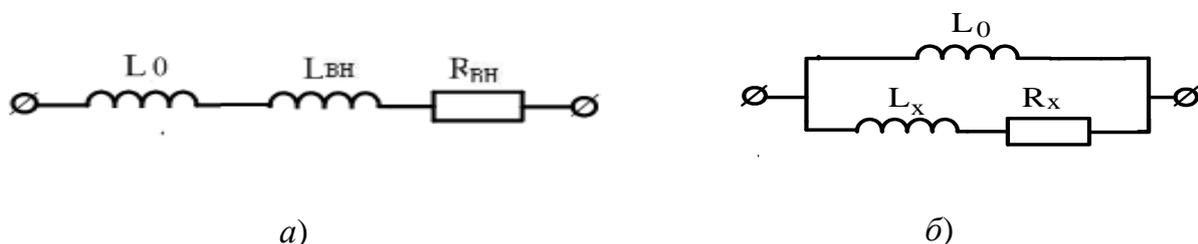


Рисунок 7 – Эквивалентные схемы замещения ВД:
 а – исходная; б – синтезированная

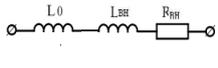
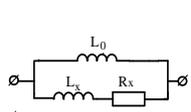
Определение $L_{вн}$ и $R_{вн}$ двухэлементной схемы замещения осуществляется пересчетом параметров L_0, L_x, R_x трехэлементной схемы замещения по формулам:

$$L_{\text{вн}} = L_0 - \frac{\text{Im}(Z)}{2\pi f}; \quad R_{\text{вн}} = \text{Re}(Z);$$

$$Z = \text{Im}(Z) + \text{Re}(Z) = j\omega(L_0 - L_{\text{вн}}) + R_{\text{вн}} = \frac{j\omega L_0 \cdot (j\omega L_x + R_x)}{j\omega L_0 + j\omega L_x + R_x}$$

Передаточная функция исходной схемы замещения в виде проводимости $Y(p)$ и синтезированной схемы замещения $Y_1(p)$ представлена в таблице 1. Параметры схем замещения были идентифицированы по частотным характеристикам при $h = 0,1$ мм и $h = 2,8$ мм.

Таблица 1 – Характеристики различных схем замещения ВД

Схема замещения	Передаточная функция	Параметры схемы замещения	Значения параметров схем замещения		Изменение параметров схемы замещения
			$h = 0,1$ мм	$h = 2,8$ мм	
 <p>исходная схема замещения</p>	$Y(p) = \frac{k_o}{T_1 p + 1} = \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$	$k_o = \frac{1}{R_{\text{вн}}}$ $T_1 = \frac{L_0 - L_{\text{вн}}}{R_{\text{вн}}}$	$L_0 = 24,4$ мкГн $L_{\text{вн}} = 5,74$ мкГн $R_{\text{вн}} = 36,91$ Ом	$L_0 = 24,4$ мкГн $L_{\text{вн}} = 8,64$ мкГн $R_{\text{вн}} = 44,48$ Ом	$L_{\text{вн}}$ изменяется на 11,3 %, $R_{\text{вн}}$ изменяется на 40,5 %
 <p>синтезированная схема замещения</p>	$Y_1(p) = \frac{k_o(T_1 p + 1)}{p(T_3 p + 1)} = \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$	$k_o = \frac{1}{L_0}$ $T_1 = \frac{L_0 + L_x}{R_x}$ $T_3 = \frac{L_x}{R_x}$	$L_0 = 24,4$ мкГн $L_x = 25,6$ мкГн $R_x = 320$ Ом	$L_0 = 24,4$ мкГн $L_x = 16,8$ мкГн $R_x = 212$ Ом	L_x изменяется на 36,2 %, R_x изменяется на 70,5 %

Для устранения влияния начальной индуктивности автором предложено ввести дополнительную компенсационную катушку, расположенную на расстоянии 15 мм от измерительной катушки, индуктивность которой не изменяется от измеряемого перемещения. Точность компенсации будет зависеть от идентичности изготовления измерительной и компенсационной катушек. Экранирующая пластина выполнена с зазором постоянной величины, равным номинальному измеряемому перемещению (зазору) между измерительной катушкой и объектом контроля, и состоит из материала, из которого изготовлен объект контроля с целью полной компенсации неинформативного параметра. Конструкция ВД представлена на рисунке 8.

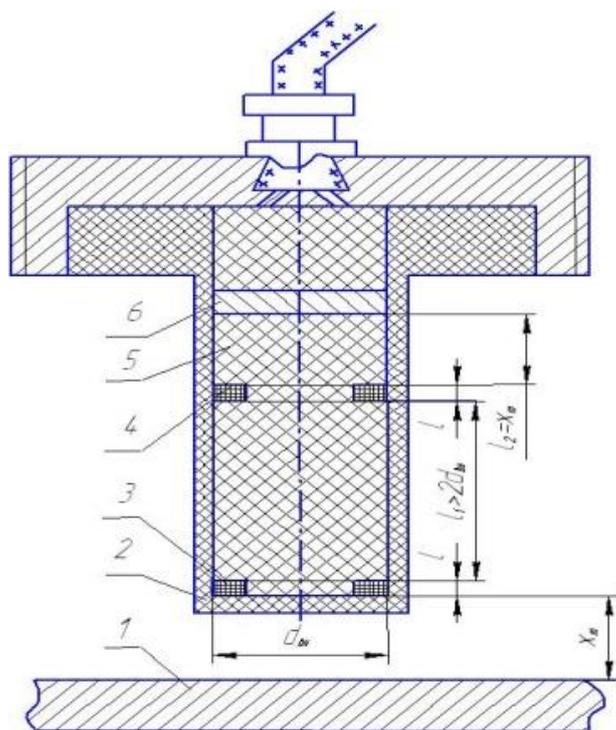


Рисунок 8 – Конструкция ВД: 1 – объект измерения; 2 – корпус; 3 – измерительная катушка индуктивности; 4 – компенсационная катушка; 5 – каркас, 6 – экранирующая пластина; h – расстояние между измерительной катушкой индуктивности и объектом измерения

Автором было проведено моделирование двух- и трехэлементных схем замещения ВД в приложении Simulink пакета Matlab. Контролировался выходной ток для двухэлементной и трехэлементной схем замещения с введенной дополнительной компенсационной катушкой. Результаты моделирования показали снижение дополнительной температурной погрешности трехэлементной схемы замещения по сравнению с двухэлементной в 1,72 раза.

Для анализа дополнительной температурной погрешности автором разработана метрологическая модель ДОиРП, представленная на рисунке 9.

По результатам анализа метрологической модели определено, что дополнительная температурная погрешность состоит из мультипликативной (изменение чувствительности) и аддитивной (уход нуля) составляющих, рассчитываемых по формулам:

$$\delta = (\delta_1 + \delta_3 + \delta_4)x, \quad \Delta_X = \Delta_1 + \Delta_{\text{нел}} + \frac{\Delta_3}{S_1} + \frac{\Delta_4}{S_1 S_3},$$

где Δ_X – аддитивная составляющая дополнительной температурной погрешности, приведенная к значению входной величине x ; δ – мультипликативная составляющая дополнительной температурной погрешности; S – чувствительность звена модели.

Уход нуля определяется главным образом неидентичностью изготовления обмоток, а изменение чувствительности связано с искажением амплитуды и частоты питания.

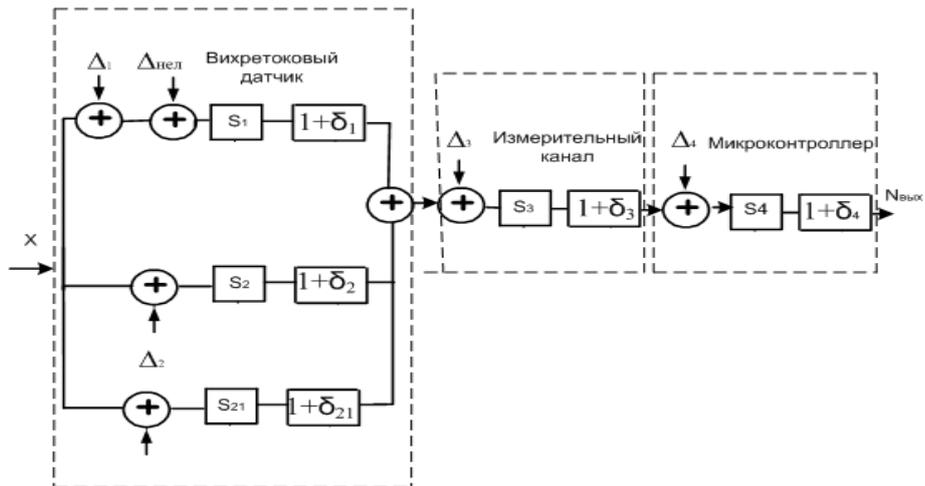


Рисунок 9 – Метрологическая модель ДОиРП

В четвертой главе представлена функциональная схема ДОиРП, которая была разработана при написании диссертации.

Функциональная схема ДОиРП с коррекцией температурной погрешности при термоударе представлена на рисунке 10, где ВД – вихретоковый датчик, ВП – вторичный преобразователь, ГВЧ – генератор высокой частоты, ИСТ1 и ИСТ2 – источники постоянного тока, ПВ1 – выпрямитель, ВОУ – высокочастотный операционный усилитель, ДУ1 и ДУ2 – дифференциальный усилитель, МК – микроконтроллер.

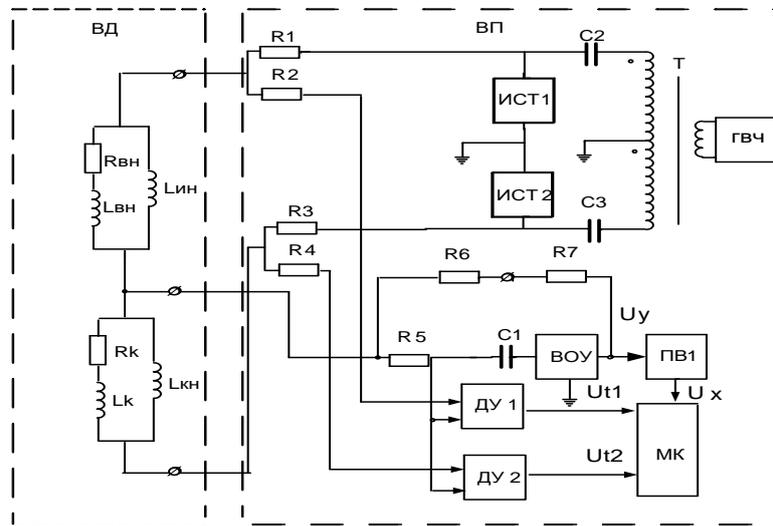


Рисунок 10 – Функциональная схема ДОиРП

Функциональная зависимость выходного сигнала (N_x) от перемещения имеет вид

$$N_x = U_y K_{ПВ1} K_{МК} = U_D \frac{R_7 K_{ПВ1} K_{МК}}{\sqrt{R_{ВН}^2(h) + (j\omega L_{ВН}(h))^2}}, \quad (5)$$

где U_y – напряжение на выходе ВОУ; U_D – напряжение, приложенное к ВД; R_7 – значение образцового резистора; $K_{ПВ1}$ – коэффициент передачи выпрямителя ПВ1, $K_{МК}$ – коэффициент передачи МК.

ВД состоит из идентичных измерительной и компенсационной катушек, включенных дифференциально. Отличие предлагаемой схемы состоит в использовании схемы включения катушек, позволяющей полностью устранить неинформативную составляющую сигнала при условии идентичного изготовления катушек индуктивности. Измерение температуры на измерительной и компенсационной катушках осуществляется по падению напряжения на сопротивлениях обмоток постоянному току. Наличие термоудара определяется по разнице напряжений U_{I1} и U_{I2} .

На рисунке 11 приведено рабочее место для проведения эксперимента на воздействие термоудара ДОиРП, где БП – блок питания, ПК – персональный компьютер, ВП – вторичный преобразователь, ВД – вихретоковый датчик, PV и PV1 – вольтметры.

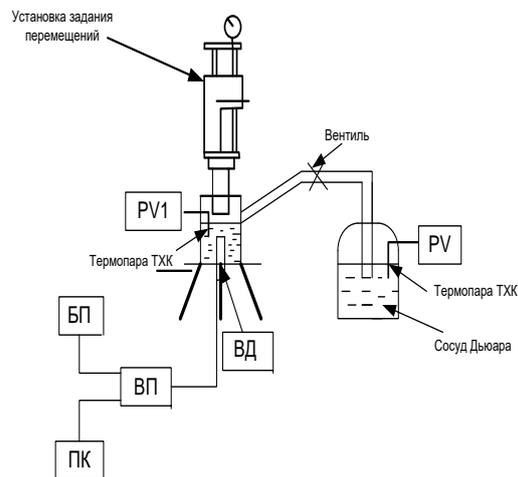


Рисунок 11 – Рабочее место для проведения эксперимента ДОиРП на воздействие термоудара

Также в четвертой главе разработана инженерная методика проведения испытаний. Технические и метрологические характеристики разработанного ДОиРП приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические и метрологические характеристики

Технические характеристики	Единица измерения	Значение
Диапазон измерений	мм	0,1–2,8
Основная приведенная погрешность	%	0,5
Температурная погрешность, не более	%	4
Выходной сигнал		Цифровой RS 485
Диапазон рабочих температур	°С	от минус 196 до плюс 123

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В приложениях представлен листинг программы в пакете программ MathCAD по расчету снижения дополнительной температурной погрешности в динамическом режиме, результаты имитационного моделирования в приложении Simulink пакета Matlab, результаты испытаний ВД информативных параметров и акт внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Получены математические модели, описывающие изменение выходного сигнала с датчиков осевых и радиальных перемещений при влиянии термоударного воздействия с использованием ядер Вольтерра второго и третьего порядков. Введено в математическую модель дополнительное условие, позволившее не только корректировать выходной сигнал с датчика осевых и радиальных перемещений, но и определять истинное значение параметра при изменяющемся перемещении во время термоударного воздействия.

2 На основании математических моделей разработана методика, позволившая снизить дополнительную температурную погрешность с 60,6 до 3,93 % на всем временном диапазоне при измерении перемещений от 0,1 до 2,8 мм. Исследованы дополнительные температурные погрешности во время изменения перемещения в разные моменты времени. С целью снижения количества проведения экспериментов предложено определять выходной сигнал с датчиков осевых и радиальных перемещений для температур, отличных от экспериментальных, с использованием сплайн-аппроксимации. Предложенная методика, помимо сравнительно высокой точности, обладает высокой универсальностью и может быть применена для датчиков других физических величин (например, датчиков давления, широко используемых в ЖРД).

3 Предложена модернизированная схема замещения ВД на основе проведенного анализа и синтеза, что позволило повысить чувствительность на 26 %, снизить дополнительную температурную погрешность в 1,72 раза и снизить методическую погрешность измерения перемещений на 45 % при эксплуатации датчиков осевых и радиальных перемещений при нестационарной температуре. Приведенные значения подтверждены результатами расчетов, а также математическим моделированием в пакете программ Simulink.

4 Разработана и внедрена функциональная схема датчика осевых и радиальных перемещений с применением предложенного схемотехнического решения и с использованием разработанной методики снижения дополнительной температурной погрешности при воздействии термоудара, разработана метрологическая модель ВД. Получены результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния термоудара на датчик осевых и радиальных перемещений. Разработана инженерная методика проведения испытаний.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ

1 Абрамов, С. В. Синтез моделей вихретоковых датчиков и их измерительных цепей / **С. В. Абрамов**, В. П. Маланин, Г. И. Косоротов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего. – 2013. – № 10 (14). – С. 203–210.

2 Абрамов, С. В. Сравнительный анализ схем замещения первичных вихретоковых / **С. В. Абрамов**, В. П. Маланин // Приборы. – 2015. – № 9. – С. 20–27.

3 Абрамов, С. В. Применение двухчастотного метода выделения информативного сигнала при построении измерительных цепей первичных вихретоковых преобразователей / **С. В. Абрамов** // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 82–90.

4 Абрамов, С. В. Исследование влияния температурных воздействий на выходной сигнал вихретоковых преобразователей с использованием имитационного моделирования / **С. В. Абрамов**, А. Д. Семенов // Приборы. – 2018. – № 12. – С. 21–27.

5 Абрамов, С. В. Исследование влияния температурной погрешности вихретокового преобразователя перемещений с учетом влияния неполной компенсации неинформативного параметра / **С. В. Абрамов**, Н. С. Ульянин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2. – С. 38–44.

Публикации, включенные в Scopus

6 Бойков, И. В. Восстановление входного сигнала вихретоковых преобразователей перемещения при термоударных воздействиях / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин, В. П. Маланин, **С. В. Абрамов**, В. В. Кикот // Измерительная техника. – 2018. – № 11. – С. 61–67.

Публикации в других изданиях

7 Маланин, В. П. Использование индуктивных датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сборник статей Международной научно-технической конференции (г. Пенза, 2008 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2008. – С. 107.

8 Семенов, А. Д. Определение параметров многоэлементной схемы замещения параметрических датчиков с использованием настраиваемой модели неминимальной реализации / А. Д. Семенов, В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сборник статей Международной научно-технической конференции (г. Пенза, 2009 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – С. 286–289.

9 Маланин, В. П. Повышение информативной способности вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сборник статей Международной научно-технической конференции (г. Пенза, 2009 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – С. 167–170.

10 Астахова, Т. В. Построение математических моделей динамических систем по экспериментальным частотным характеристикам / Т. В. Астахова, **С. В. Абрамов**, О. В. Михайлович // Датчики и системы : сборник докладов XXX межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (г. Пенза, 30–31 марта 2011 г.). – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2011. – С. 197–201.

11 Семенов, А. Д. Коррекция функции преобразования вихретоковых датчиков с применением статических нейронных сетей / А. Д. Семенов, В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сборник статей Международной научно-технической конференции (г. Пенза, 2011 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2011. – С. 299–302.

12 Маланин, В. П. Применение математического и физического моделирования при построении измерительных цепей вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2012. – № 1. – С. 40–44.

13 Маланин, В. П. Микропроцессорная коррекция функции преобразования вихретоковых преобразователей для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы – 2012) : труды Международной научно-технической конференции с элементами научной школы для молодых ученых (г. Пенза, 22–26 октября 2012 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – С. 179–185.

14 Маланин, В. П. Повышение информативной способности вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Авиация и космонавтика – 2012 : тезисы докладов Международной конференции (г. Москва, 13–15 ноября 2012 г.). – Санкт-Петербург : Мастерская печати, 2012. – С. 234.

15 Маланин, В. П. Анализ и синтез схем замещения первичных вихретоковых преобразователей для бесконтактного измерения перемещения / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Датчики и системы : сборник трудов XXXI межрегиональной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов (г. Пенза, 25–26 сентября 2013 г.). – Пенза : ОАО «НИИФИ», 2013. – С. 182–187.

16 Маланин, В. П. Повышение информативной способности вихретоковых датчиков для бесконтактного измерения перемещений / В. П. Маланин, **С. В. Абрамов** // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 76–81.

17 Абрамов, С. В. Коррекция температурной погрешности вихретокового преобразователя для бесконтактного измерения перемещений / **С. В. Абрамов** // Методы, средства и технологии получения измерительной информации : материалы Международной научно-технической конференции «Шляндинские чтения – 2018», посвященной 100-летию со дня рождения В. М. Шляндина (г. Пенза, 19–21 ноября 2018 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 58–62.

Охранные документы интеллектуальной собственности

18 Патент 2515216 Российской Федерации, МПК G01L27/90. Устройство формирования выходного сигнала индуктивного дифференциального измерительного преобразователя / Маланин В. П., Колганов В. Н., Абрамов С. В. ; правообладатель АО «НИИФИ». – Заявл. 07.11.2012 ; опублик. 12.03.2014, Бюл. № 9.

19 Патент 2487314 Российской Федерации, МПК G01N27/90. Вихретоковый преобразователь перемещений / Маланин В. П., Колганов В. Н., Абрамов С. В., Пресняков М. Д. ; правообладатель АО «НИИФИ». – Заявл. 23.12.2011 ; опублик. 10.07.2013, Бюл. № 9.

Научное издание

Абрамов Сергей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКОВ ОСЕВЫХ
И РАДИАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ
И ТЕРМОУДАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

2.2.4 – Приборы и методы измерения
(электрические и магнитные величины) (технические науки)

Редактор *А. Г. Темникова*

Технический редактор *Ю. В. Анурова*

Компьютерная верстка *Ю. В. Анурова*

Распоряжение № 75/212 от 06.10.2021

Подписано в печать 07.10.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,39. Заказ № 535. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел. 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru