

Балыков Александр Владимирович

**Разработка многоэлементного пьезорезонансного датчика уровня сыпучих материалов с использованием связанных колебаний вибраторов**

Специальность: 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2010

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете им. И.И.Ползунова

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Седалищев Виктор Николаевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Абанин Виктор Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент  
**Первухин Борис Семенович**

Ведущая организация: Федеральный научно – производственный центр «Алтай»  
(г. Бийск)

Защита диссертации состоится «28» декабря 2010 г. в 9:30 на заседании диссертационного совета Д212.004.06, действующего при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, ауд. 127 гл.к.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета, по указанному адресу:

656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46. E-mail: [krivobok@ab.ru](mailto:krivobok@ab.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И.И.Ползунова.

Автореферат разослан 26 ноября 2010г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

**Д.Е. Кривобоков**

## Общая характеристика работы

*Актуальность работы.* Одной из актуальных и в то же время труднорешаемых задач при автоматизации технологических процессов, в частности, в зерноперерабатывающей промышленности является измерение уровня сыпучих материалов в емкостях больших размеров. Разработанные к настоящему времени разнообразные методы и средства измерения уровней, изменяющихся в широких пределах, малоприспособны для работы в условиях сильной запыленности, при наличии механических и тепловых воздействий на чувствительный элемент датчика.

В настоящее время для использования в тяжелых условиях эксплуатации наиболее широкое распространение получили вибрационные датчики уровня камертонного типа. Но они чувствительны к сильным механическим воздействиям, имеют ограниченный диапазон рабочих температур (в основном до 250°C), применяются только для контроля достижения предельных значений уровней. К их недостаткам относится и то, что подвижные части камертона, совершая низкочастотные изгибные колебания, могут образовывать пустоты в сыпучих материалах.

Таких недостатков лишены составные пьезорезонансные датчики уровня сыпучих материалов, разработанные в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова. Устройства данного типа характеризуются высокой чувствительностью, конструктивно просты, имеют сравнительно низкую стоимость, применимы для эксплуатации в тяжелых условиях (диапазон рабочих температур может достигать 1000°C). Принцип их работы основан на реализации функциональной зависимости амплитуды колебаний плоского металлического вибратора от величины статического давления на его поверхность, создаваемого измеряемой средой. Чувствительный элемент датчика совершает продольные колебания, что практически исключает возможность образования пустот в рабочей области вибратора.

К недостаткам устройств такого типа можно отнести то, что они малоприспособны для измерения уровней сыпучих материалов, изменяющихся в широких пределах (десятки метров), их выходная характеристика не линейная и с увеличением измеряемого уровня чувствительность датчика сильно убывает.

С целью расширения диапазона измеряемых уровней сыпучих материалов, линеаризации рабочей характеристики датчика, при сохранении достаточно высокой чувствительности во всем диапазоне измеряемых уровней был разработан многоэлементный вариант конструктивного исполнения пьезорезонансного датчика (МЭ ПРД) уровня сыпучих материалов. Первичный измерительный преобразователь такого датчика представляет собой сложную колебательную систему, состоящую из большого числа акустически связанных, взаимодействующих между собой пьезорезонаторов и вибраторов. Использование согласованного ансамбля вибраторов, распределенных по высоте измеряемой емкости, позволило существенно расширить диапазон измеряемых уровней, линеаризовать выходную характеристику датчика, повысить надежность работы датчика, так как выход из строя одного или даже нескольких вибраторов не вызывает отказа работоспособности устройства в целом.

*Цель работы.* Разработка МЭ ПРД с расширенным диапазоном измеряемых значений уровней сыпучих материалов, применимого для тяжелых условий эксплуатации.

*Задачи исследований:*

1. Выполнить аналитический обзор методов и средств измерения уровня сыпучих материалов, изменяющегося в широких пределах.
2. Обосновать необходимость использования режима взаимосвязанных колебаний удаленных вибраторов для построения датчика с расширенным диапазоном измерения уровня сыпучих материалов.
3. Разработать упрощенную математическую модель МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.
4. Выполнить анализ особенностей реализации режимов связанных колебаний в многоосцилляторных ансамблях, состоящих из взаимодействующих пьезорезонаторов и вибраторов.
5. Осуществить имитационное моделирование и исследование режимов работы различных вариантов конструктивного исполнения многоэлементных пьезорезонаторных датчиков уровня сыпучих материалов.
7. Выработать рекомендации по расчету и конструированию первичных измерительных преобразователей МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.
8. Разработать опытный образец многоэлементного пьезорезонансного датчика уровня сыпучих материалов и произвести его испытания в производственных условиях.

*Объект исследования.* Процессы формирования сигналов измерительной информации в многоэлементных датчиках, состоящих из взаимодействующих между собой пьезорезонаторов и вибраторов.

*Предмет исследований.* Закономерности, описывающие механизм чувствительности разработанного первичного измерительного преобразователя, реализующего режимы сильной и слабой связанности в колебательной системе МЭ ПРД.

*Методы исследований.* В диссертационной работе использованы методы теории линейных и нелинейных цепей, теории измерений, методы имитационного моделирования динамических процессов в сложных колебательных системах, методы математической статистики и обработки экспериментальных данных.

*Научную новизну работы* составляют:

1. Вибрационный метод измерения уровня с аналогово-дискретным выходом, основанный на использовании системы пространственно разнесенных, акустически связанных между собой пьезорезонаторов и вибраторов, позволяющий существенно расширить диапазон измеряемых уровней сыпучих материалов.
2. Аналитические зависимости, описывающие в упрощенном виде режимы связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы, полученные с использованием статистического подхода к оценке обобщенных параметров многоэлементных измерительных преобразователей, что позволило разработать методы расчета и проектирования МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.
3. Метод линеаризации выходной характеристика МЭ ПРД уровня сыпучих материалов, основанный на реализации режима сильной связанности между парциальными колебательными системами первичного измерительного преобразователя, что позволило разработать новое поколение вибрационных датчиков дискретного типа с плавной и линейной выходной характеристикой.
4. МЭ ПРД уровня сыпучих материалов с аналоговым выходом, расширенным диапазоном измерения, применимые для тяжелых условий эксплуатации.

### *Практическая значимость диссертационной работы.*

1. Предлагаемый подход к совершенствованию методов и средств измерения уровня, основанный на использовании связанных колебаний в многоэлементных пьезорезонансных первичных измерительных преобразователях, позволяет обеспечить решение задачи создания высокочувствительных пьезорезонансных датчиков уровня сыпучих материалов, с аналоговым выходом, расширенным диапазоном измерения, применимых для тяжелых условий эксплуатации.

2. Полученные аналитические зависимости, основанные на использовании статистического подхода к оценке обобщенных параметров колебательной системы датчика с конечным числом степеней свободы, позволяет формализовать процесс расчета и проектирования МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.

3. Применение имитационного моделирования связанных колебаний в многоосцилляторных ансамблях позволяет существенно упростить разработку и конструирование МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.

*Реализация результатов исследований.* Научные результаты диссертационной работы нашли практическое применение на предприятиях зерноперерабатывающей и строительной промышленности: ЗАО «СоюзМука» – для измерения уровня зерна в силосах, ОАО «ЗПК Барнаульская мельница» – для измерения уровня муки в танках. Разработанный стенд для проведения экспериментальных исследований режимов связанных колебаний в сложных многоосцилляторных ансамблях используется в учебном процессе на кафедре информационных технологий АлтГТУ.

### *Положения, выносимые на защиту.*

1. Аналитические зависимости, полученные с использованием обобщенных статистических характеристик колебательной системы МЭ ПРД, описывающие асинхронный, синхронный и бифуркационный режимы его работы.

2. Метод расширения диапазона измеряемых уровней сыпучих материалов, основанный на использовании большого числа сильносвязанных вибраторов.

3. Метод линеаризации и обеспечения плавности выходной характеристики датчика уровня сыпучих материалов дискретного типа, основанный на использовании режима сильной связанности между парциальными колебательными системами многоэлементного первичного измерительного преобразователя.

4. Метод повышения чувствительности пьезорезонансного датчика уровня, основанный на использовании режима слабой связанности между парциальными колебательными системами многоэлементного первичного измерительного преобразователя.

5. Критерии и условия, позволяющие реализовать аналогово-дискретный режимы работы многоэлементного датчика уровня сыпучих материалов, расширить его рабочий диапазон.

### *Апробация работы.*

Основные положения и результаты работы докладывались на международных научно-практических конференциях «Виртуальные и интеллектуальные системы», ВИС (Барнаул, 2007 – 2010), на конкурсе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса», У.М.Н.И.К. (г. Барнаул, 2008), на международной научно-технической конференции "Измерение, контроль, информатизация" (г. Барнаул, 2008), на международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» (г. Пенза, 2010).

*Публикации.* По материалам диссертации опубликовано 19 работ, из них: 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; 17 статей в региональных журналах.

*Структура диссертации.* Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 162 наименований. Общий объем работы составляет 184 страниц машинописного текста, содержит 3 таблиц, 92 рисунка.

## Содержание работы

**Во введении** к диссертации обоснована ее актуальность, сформулированы цели, задачи и методы исследований, определены научная новизна и практическая значимость результатов работы, отражены вопросы апробации и реализации полученных результатов, представлены структура диссертационной работы и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** приведены обзор и анализ методов и средств измерения уровня сыпучих материалов, с использованием предложенной классификации, что позволило обосновать основные направления совершенствования и принципы построения нового поколения электромеханических измерительных устройств вибрационного типа с аналогово-дискретным выходом, применимых для контроля уровня, изменяющегося в широких пределах. Сформулированы цели и задачи проведения соответствующих исследований.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы, связанные с разработкой метода измерения в широких пределах уровня сыпучих материалов, применимого для тяжелых условий эксплуатации. Разработаны теоретические основы создания многоэлементных датчиков вибрационного типа, описаны принципы построения и особенности функционирования МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.

Основная идея работы заключается в том, что для расширения диапазона измеряемых значений уровней сыпучих материалов, обеспечения линейности выходной характеристики датчика уровня сыпучего материала предлагается разработать многоэлементный первичный измерительный преобразователь вибрационного типа, состоящий из большого числа взаимодействующих между собой вибраторов и пьезорезонаторов.

Разработка теоретической базы создания многоэлементных датчиков вибрационного типа сопряжена с большими трудностями аналитического описания динамики нелинейных процессов взаимосвязанных колебаний и волн в сложных системах с сосредоточенными и распределенными параметрами. Как известно из теории колебаний, при выполнении определенных условий в таких системах возможна реализация различных режимов взаимодействий между отдельными степенями свободы, сопровождающиеся синхронизацией и бифуркацией связанных колебаний, возможно установление режима биения колебаний с частичным увеличением частот и т.п.

Колебательные процессы в таких ансамблях описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений, причем в большинстве случаев, возможно только их приближенное решение. При этом приходится вводить те или иные допущения в зависимости от особенностей задач, которые ставятся при их исследовании.

Таким образом, одним из препятствий разработки и широкого внедрения многоэлементных датчиков вибрационного типа, основанных на использовании связанных колебаний в сложных динамических системах, является отсутствие теоретических

основ, методик расчета и проектирования таких устройств. В связи с этим, предлагается в основу создания теоретической базы построения таких устройств положить разработку упрощенной математической модели многоосцилляторной колебательной системы с конечным числом степеней свободы. Модель должна отражать специфику статических и динамических процессов, происходящих в реальных колебательных системах, давать их количественную характеристику, описывать происходящие процессы в функции времени. При этом такая упрощенная математическая модель сложной колебательной системы должны быть удобной для применения в инженерной практике. Эквивалентные электрические схемы замещения (ЭЭСЗ) многоэлементных датчиков вибрационного типа, в том числе МЭ ПРД, полученные с использованием данной методики, должны адекватно отражать режимы работы реальных устройств.

С целью упрощения анализа связанных колебаний в МЭ ПРД предлагается применить метод «условных контуров», разработанный первоначально для описания режимов работы ПРД, основанных на использовании связанных колебаний в системах с двумя степенями свободы. В основу данного метода был положен принцип представления режимов связанных колебаний с использованием двух условных контуров: контура, содержащего усредненные параметры системы и контура, отражающего наличие небаланса в системе.

Идея данного метода заключается в том, что высокочастотная и низкочастотная составляющие колебательной энергии системы, представляются сосредоточенными в двух отдельных условных контурах: в одном контуре – неизменная во времени часть энергии колебательной системы, а в другом – энергия небаланса, представляющая собой переменную составляющую полной энергии системы. При этом асинхронному режиму связанных колебаний в системе соответствует преобладание составляющей энергии небаланса в колебательной системе. Условный колебательный контур, в котором сосредоточена энергия небаланса колебательной системы, в общем случае может содержать активные и реактивные компоненты. Поэтому его ЭЭСЗ может включать в себя накопительные элементы ( $L_{\Delta}, C_{\Delta}$ ), ЭДС небаланса в системе, а также активное сопротивление ( $R_{\Delta}$ ), характеризующее уровень взаимодействия между парциальными системами. Определив параметры условного контура небаланса можно производить упрощенный анализ динамики поведения колебательной системы в целом.

Для определения параметров условных контуров сложных динамических систем с большим числом степеней свободы предлагается использовать статистический подход. При этом путем статистической обработки массива параметров сложной колебательной системы можно оценить значения усредненных параметров условных контуров. Например, таким образом можно определить приближенные значения амплитуды и частоты синхронизированных колебаний в системе. С использованием понятия среднего квадратичного отклонения случайной величины можно определить параметры условного контура небаланса в системе, усредненные значения разброса амплитуд и частот колебаний в парциальных колебательных системах. Таким образом, применение метода условных контуров с использованием методов нелинейного статистического оценивания его параметров позволит осуществить замену сложной колебательной системы более простой системой, состоящей из двух условных кон-

туров, параметры которых могут быть достаточно легко рассчитаны с использованием данных об отдельных контурах.

Например, согласно предложенному упрощенному подходу к анализу сложных динамических систем по аналогии с описанием связанных колебаний в системах с двумя степенями свободы можно получить аналитические зависимости, описывающие изменение во времени усредненной огибающей связанных колебаний ( $\bar{x}$ ) в системе, содержащей ( $n$ ) парциальных контуров:

$$\begin{cases} \bar{x} = \bar{A}(t) \cdot \cos[\bar{\omega}t - \varphi(t)] \\ \bar{A}(t) = \bar{A}_0 + \frac{\tilde{\gamma}\bar{\omega}}{2\tilde{\Omega}} \cdot \bar{B}(t) \sin \tilde{\Omega}t \\ \tilde{\Omega} = \Delta\bar{\omega}\sqrt{1 - \tilde{\lambda}^2} \end{cases}$$

$$\tilde{\lambda} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \bar{\omega} \cdot \tilde{\aleph}}{\Delta\bar{\omega}} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \Delta\bar{A}}{\Delta\bar{\omega} \cdot \bar{A}}; \quad \bar{\omega} \approx \frac{\Sigma\omega_i}{n}; \quad \Delta\bar{\omega} = \sqrt{\frac{\Sigma(\omega_i - \bar{\omega})^2}{n}}; \quad \Delta\bar{A} = \sqrt{\frac{\Sigma(A_i - \bar{A})^2}{n}},$$

где  $\bar{A}$ , ( $\bar{B}$ ),  $\Delta\bar{A}$  – усредненное значение амплитуды связанных колебаний в условном контуре небаланса в системе и глубины ее модуляции;

$\bar{\omega}$ ,  $\Delta\bar{\omega}$  – приближенное значение частоты синхронизированных колебаний в системе и усредненная расстройка собственных частот парциальных контуров;

$\tilde{\xi}$  – усредненная относительная расстройка собственных частот контуров;

$\tilde{\aleph}$  – усредненная относительная расстройка амплитуд колебаний в контурах;

$\tilde{\Omega}$  – усредненная частота биения колебаний в системе;

$\tilde{\gamma}$  – усредненное значение коэффициентов связи между контурами;

$\tilde{\lambda}$  – усредненное значение коэффициента взаимодействия между парциальными колебательными системами.

По величине среднеквадратических отклонений параметров системы относительно их усредненных величин можно определить: усредненные значения разбросов напряжений и токов в парциальных контурах.

Например, усредненные значения разбросов эквивалентных емкостей ( $\tilde{C}_y$ ) и индуктивностей ( $\tilde{L}_y$ ) в условных контурах; усредненные значения разбросов собственных частот контуров ( $\bar{\omega}_y$ ); обобщенные относительные расстройки частот ( $\tilde{\xi}$ ), амплитуд и фаз колебаний; усредненное значение коэффициентов связи между контурами ( $\tilde{\gamma}$ ) можно определить с использованием следующих приближенных формул:

$$\tilde{\xi}_L = \frac{\Delta\tilde{L}}{\tilde{L}} \approx \frac{\sqrt{\Sigma(L_i - \tilde{L})^2/n}}{\tilde{L}}, \quad L_y \approx \frac{\tilde{L}^2}{\Delta\tilde{L}} \approx \frac{\tilde{L}}{\tilde{\xi}_L}.$$

$$\tilde{\xi}_C = \frac{\Delta\tilde{C}}{\tilde{C}} \approx \frac{\sqrt{\Sigma(C_i - \tilde{C})^2/n}}{\tilde{C}}, \quad N_y \approx \frac{\tilde{N}}{\tilde{\xi}_N}.$$

Здесь  $\tilde{\xi}_L$  и  $\tilde{\xi}_C$  соответствуют усредненным значениям относительных расстроек индуктивностей и емкостей взаимодействующих контуров, что определяют в итоге обобщенную расстройку парциальных частот отдельных контуров:



$$(\tilde{\xi} = \frac{1}{2}\tilde{\xi}_L + \frac{1}{2}\tilde{\xi}_C).$$

Эквивалентное активное сопротивление контура небаланса ( $R_\Delta$ ) пропорционально величине обобщенной связи между парциальными осцилляторами ( $\tilde{\gamma}$ ), а также зависит от обобщенной расстройки частот ( $\tilde{\xi}$ ) и обобщенного разбаланса амплитуд связанных колебаний ( $\tilde{\aleph}$ ) во взаимодействующих контурах:

$$R_\Delta = (x_C)_\Delta \cdot \tilde{\aleph} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \tilde{x} \cdot \tilde{\aleph}}{\tilde{\xi}} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \tilde{Q} \cdot \tilde{\aleph} \cdot \tilde{R}}{\tilde{\xi}} = 2\tilde{\lambda} \cdot \tilde{Q} \cdot \tilde{R}.$$

Добротность условного контура небаланса можно определить, используя следующие соотношения:

$$Q_\Delta = \frac{x_\Delta}{R_\Delta} = \frac{\tilde{\xi} \cdot \tilde{Q} \cdot \tilde{R}}{\tilde{\gamma} \cdot \tilde{\aleph} \cdot \tilde{Q} \cdot \tilde{R}} = \frac{1}{2\tilde{\lambda}}; \quad \tilde{\aleph} = \frac{2\Delta\tilde{U}}{\tilde{U}};$$

$$(x_C)_\Delta \approx \frac{1}{\Delta\tilde{\omega} \cdot \tilde{C}} \approx \frac{1}{\tilde{\xi}} \cdot \tilde{\gamma} \cdot \tilde{x} = \frac{\tilde{\gamma}}{\tilde{\xi}} \cdot \tilde{Q} \cdot \tilde{R}; \quad L_{\tilde{\gamma}} = \frac{\tilde{L}}{\tilde{\xi}} = \frac{\tilde{L}\tilde{\omega}}{\Delta\tilde{\omega}};$$

$$\Delta\tilde{\omega} \cdot L_{\tilde{\gamma}} = \tilde{\omega}\tilde{L}; \quad (x_L)_\Delta = (x_L)_0 = (\tilde{x}_L).$$

Физический смысл равенства реактансов высокочастотного и низкочастотного условных контуров заключается в том, что можно рассматривать частоту биения колебаний как низкочастотные колебания в контуре небаланса, так как с одной стороны:

$$\Delta\tilde{\omega} = \frac{1}{\sqrt{(\tilde{L} - \Delta\tilde{L})\tilde{C}}} - \frac{1}{\sqrt{\tilde{L}(\tilde{C} + \Delta\tilde{C})}} = \frac{1}{\sqrt{\tilde{L} \cdot \tilde{C}}} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \tilde{\xi}_L}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\xi}_C}} \right) \approx$$

$$\approx \tilde{\omega} \cdot \left( \frac{1}{2}\tilde{\xi}_L + \frac{1}{2}\tilde{\xi}_C \right) \approx \tilde{\omega} \cdot \tilde{\xi},$$

а с другой стороны:

$$\Delta\tilde{\omega} = \frac{1}{\sqrt{L_{\tilde{\gamma}} \cdot C_{\tilde{\gamma}}}} = \sqrt{\frac{\tilde{\xi}^2}{\tilde{L} \cdot \tilde{C}}} = \tilde{\xi} \cdot \tilde{\omega} = \omega_\Delta.$$

Таким образом, согласно предложенной методике эквивалентирования сложных колебательных систем, колебания в системе любой сложности в упрощенном виде можно представить в виде усредненных высокочастотных колебаний, модулированных усредненной низкочастотной составляющей. При возбуждении контуров от отдельных генераторов в системе возможна реализация синхронного и асинхронного режимов связанных колебаний. При этом параметры условного контура небаланса будут определять характер процессов взаимообмена энергией между отдельными осцилляторами сложной колебательной системы.

Соответственно можно провести аналогию между характером протекания динамических процессов в сложной колебательной системе с режимами колебаний в ее условных контурах. Например, высокочувствительному режиму бифуркации связанных колебаний в сложной системе ( $\tilde{\lambda} < 1$ ) соответствует аperiодический режим колебаний в условном контуре небаланса. Синхронному режиму связанных колебаний в системе, реализуемому при выполнении условия ( $\tilde{\lambda} > 1$ ), соответствует аperiодиче-

ский процесс колебаний в условном контуре небаланса. Бифуркационному режиму связанных колебаний в сложной динамической системе, реализуемому при выполнении условия ( $\tilde{\lambda} \approx 1$ ), соответствует критическому режиму колебаний в условном контуре небаланса.

Разработанный метод усредненных условных контуров может быть использован также и для целей упрощенного анализа динамических процессов в измерительных устройствах, состоящих из большого числа взаимодействующих осцилляторов. Например, при ступенчатом изменении параметров такой сложной колебательной системы в ней установятся переходные процессы, которые достаточно трудно описываются с позиций общей теории колебаний. Используя метод усредненных условных контуров можно исследовать режимы связанных колебаний в таких сложных динамических системах с использованием известных аналитических зависимостей, описывающих переходные процессы в простых колебательных системах. При этом вместо показателя, характеризующего затухание в колебательном контуре, нужно использовать усредненный коэффициент взаимодействия колебательной системы ( $\tilde{\lambda}$ ). Используя указанную аналогию, получим следующие зависимости для передаточной функции  $h(t)$  сложной колебательной системы:

а) для асинхронного режима связанных колебаний в системе ( $\tilde{\lambda} < 1$ )

$$h(t) = k \left[ 1 - \frac{e^{-\tilde{\lambda} \cdot \Delta \tilde{\omega} t}}{\sqrt{1 - \tilde{\lambda}^2}} \sin \left( \sqrt{1 - \tilde{\lambda}^2} \Delta \tilde{\omega} \cdot t + \arccos \tilde{\lambda} \right) \right];$$

б) в окрестностях режима бифуркации связанных колебаний ( $\tilde{\lambda} \approx 1$ )

$$h(t) = k \left[ 1 - (1 + \Delta \tilde{\omega} \cdot t) e^{-\Delta \tilde{\omega} t} \right];$$

в) для режима синхронизма в системе ( $\tilde{\lambda} > 1$ )

$$h(t) = k \left[ 1 - \frac{e^{-\tilde{\lambda} \cdot \Delta \tilde{\omega} t}}{\sqrt{\tilde{\lambda}^2 - 1}} \operatorname{sh} \left( \Delta \tilde{\omega} \cdot t \cdot \sqrt{\tilde{\lambda}^2 - 1} + \operatorname{arccch} \tilde{\lambda} \right) \right],$$

где  $k$  – номинальный коэффициент преобразования.

Применение метода усредненных условных контуров для анализа связанных колебаний в многоосцилляторных системах, позволяет существенно упростить анализ динамических процессов в таких сложных системах, как в многоэлементных пьезорезонансных датчиках уровня сыпучих материалов, разработать упрощенную методику их расчета и проектирования. Путем рационального использования соответствующих режимов связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы можно обеспечить получение необходимых технических и метрологических характеристик многоэлементных датчиков вибрационного типа.

В частности, для создания МЭ ПРД уровня сыпучих материалов с расширенным диапазоном измерения, целесообразно использовать синхронный режим связанных колебаний вибраторов и пьезорезонаторов. Механизм чувствительности измерительных устройств такого типа основан на реализации функциональной зависимости акустических потерь колебательной системы датчика от площади фактического контакта вибраторов с частицами вещества, формируемой под действием статического давления, создаваемого измеряемой средой. При этом будем считать, что усреднен-

ная механическая добротность ( $\tilde{Q}$ ) колебательной системы датчика определяется в основном излучением акустической энергии в контролируруемую среду:

$$\tilde{Q} = \tilde{Q}_0 \cdot \frac{1}{A + B \cdot \left( \frac{\rho_B c_B}{\rho_C c_C} \right) \cdot s_\phi(H)}$$

где  $A, B$  – конструктивные параметры колебательной системы датчика,

$s_\phi(H)$  – фактическая площадь поверхности вибраторов с частицами среды, зависящая от величины измеряемого уровня сыпучего материала ( $H$ );

$\rho_C c_C, \rho_B c_B$  – акустические импедансы измеряемой среды и вибраторов;

$\tilde{Q}_0$  – усредненная механическая добротность колебательной системы датчика при отсутствии контакта вибраторов с измеряемой средой.

При использовании дифференциального варианта МЭ ПРД уровня сыпучих материалов разбаланс амплитуд выходных напряжений ( $\Delta U_{\text{вых}}$ ), снимаемых с генераторных обкладок взаимодействующих пьезорезонаторов, будет зависеть не только от изменения механической добротности вибраторов ( $\Delta Q$ ), но также и от степени взаимодействия ( $\tilde{\lambda}$ ) их между собой:

$$\Delta U_{\text{вых}} \approx k \cdot U_{\text{вх}} \cdot \frac{\Delta \tilde{Q}}{\tilde{\lambda}^2 - 1},$$

где  $k$  – параметр, характеризующий процессы электромеханического преобразования колебательной энергии в пьезорезонаторах;

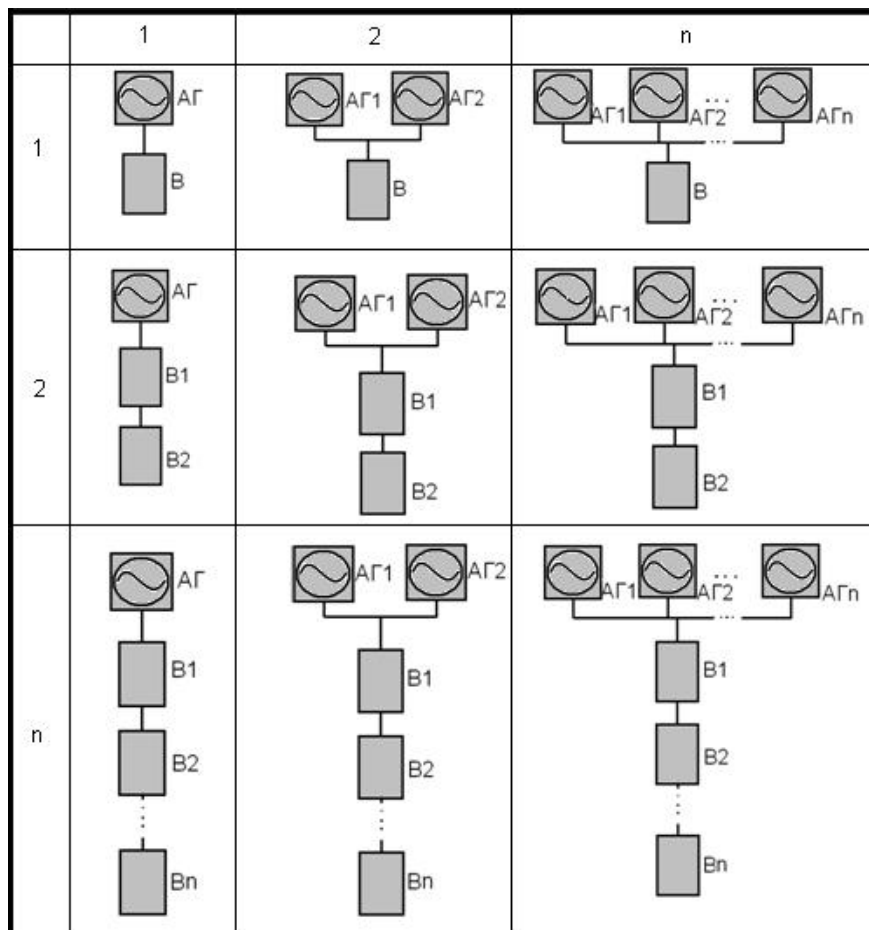
$U_{\text{вх}}$  – входное напряжение преобразователя (соответствует величине выходного напряжения генератора колебаний).

По мере заполнения емкости сыпучим материалом изменяется усредненная механическая добротность колебательной системы датчика, что приводит к снижению его чувствительности. При малых значениях коэффициента взаимодействия парциальных колебательных систем датчика ( $\sqrt{2} \geq \tilde{\lambda} \geq 1$ ) обеспечивается режим высокой чувствительности, но это обуславливает уменьшение диапазона измеряемых уровней.

В связи с тем, что точное аналитическое описание режимов связанных колебаний в многоосцилляторных ансамблях является достаточно трудоемкой задачей, исследование режимов работы различных вариантов построения МЭ ПРД было осуществлено с использованием методов имитационного моделирования.

**В третьей главе** приведены результаты имитационного моделирования МЭ ПРД уровня сыпучих материалов с использованием программы Micro-Cap.

На рисунке 2 приведена классификация возможных вариантов конструктивного исполнения МЭ ПРД.



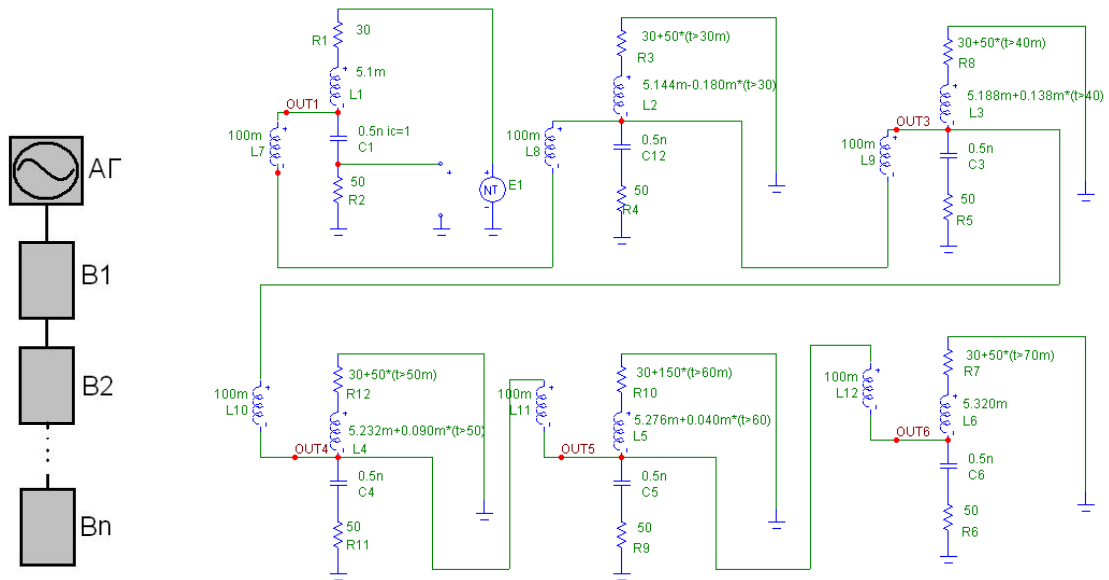
АГ – автогенератор; В – вибратор

Рисунок 2 – Классификация вариантов конструктивного исполнения МЭ ПРД.

Анализ работы многоэлементных первичных измерительных преобразователей, основанных на реализации связанных колебаний в сложных динамических системах, их имитационное моделирование было осуществлено с использованием упрощенных физических моделей и эквивалентных электрических схем замещения (ЭЭСЗ) МЭ ПРД.

Согласно приведенной классификации вариантов конструктивного исполнения МЭ ПРД было проведено исследование режимов работы трех вариантов датчиков - с возбуждением колебаний по схеме с одним автогенератором, с двумя автогенераторами и многогенераторный вариант датчика.

На рисунке 2 представлены структурная и ЭЭСЗ одногенераторного варианта МЭ ПРД, на рисунке 3 - графики изменения выходного сигнала датчика в функции измеряемого уровня, пропорционального времени заполнения емкости сыпучим материалом.



АГ – автогенератор; В1...Вn – вибраторы

Рисунок 2 – ЭЭСЗ и структурная схема МЭ ПРД с одним автогенератором.

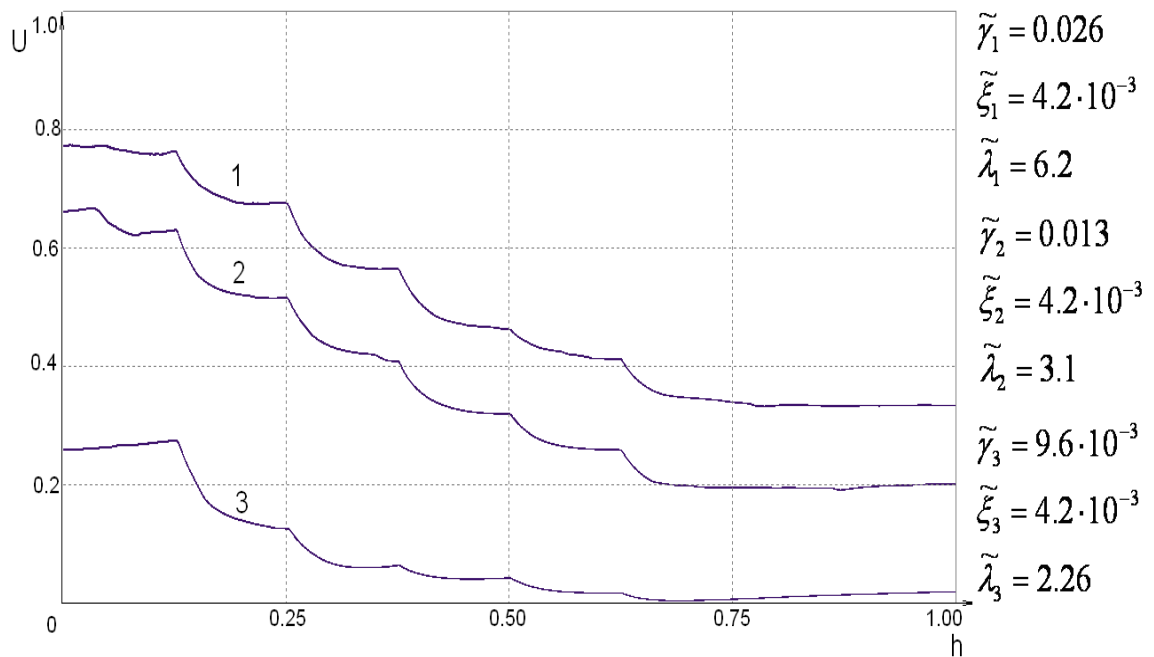
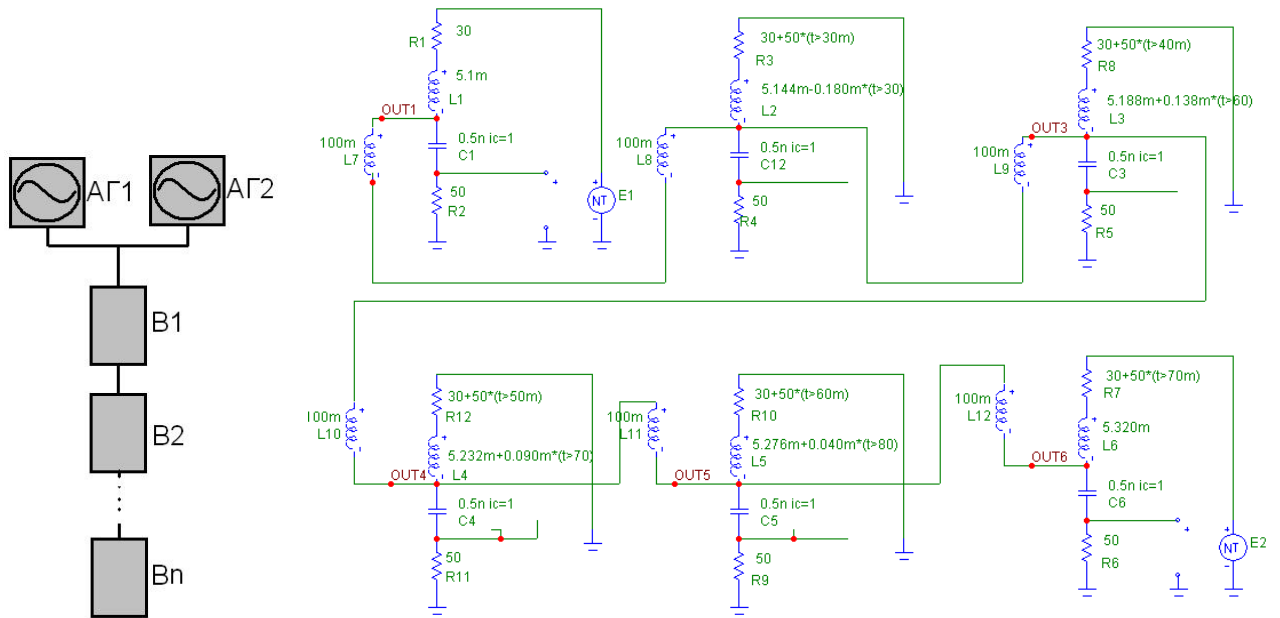


Рисунок 3 – Расчетные нагрузочные характеристики МЭ ПРД с одним автогенератором, построенные при различных обобщенных параметрах колебательной системы датчика.

На рисунке 4 приведены структурная схема дифференциального варианта МЭ ПРД уровня сыпучих материалов, его ЭЭСЗ и результаты имитационного моделирования режимов работы для трех вариантов значений обобщенных параметров колебательной системы датчика.



АГ – автогенератор; В – вибратор

Рисунок 4 – Структурная схема дифференциального варианта МЭ ПРД уровня и его ЭЭСЗ.

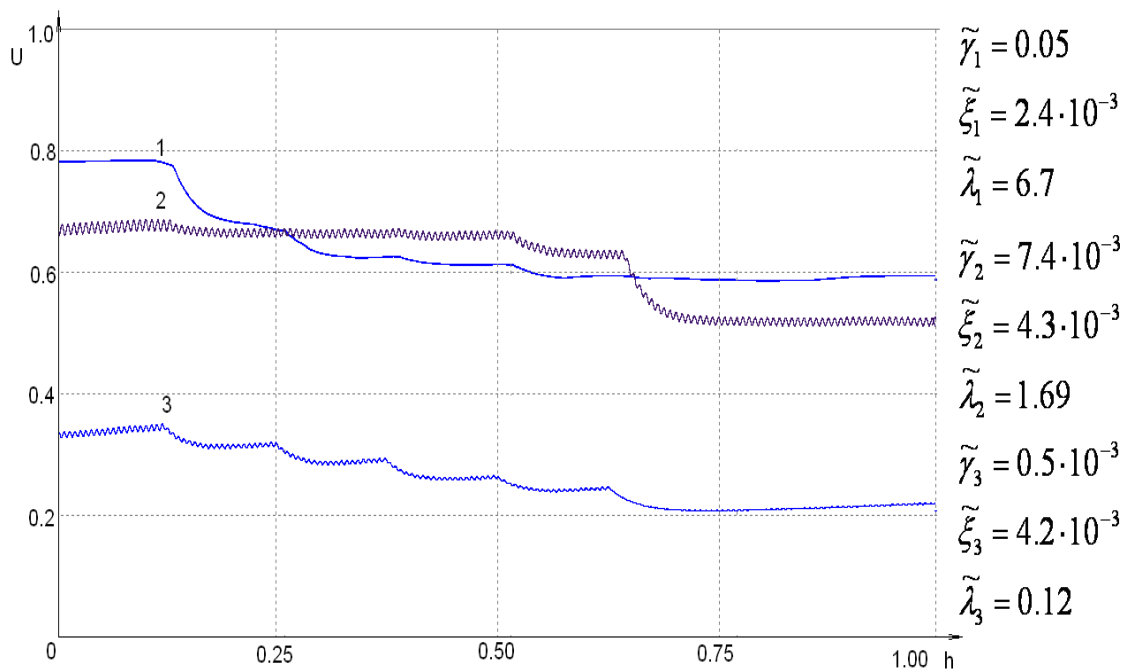
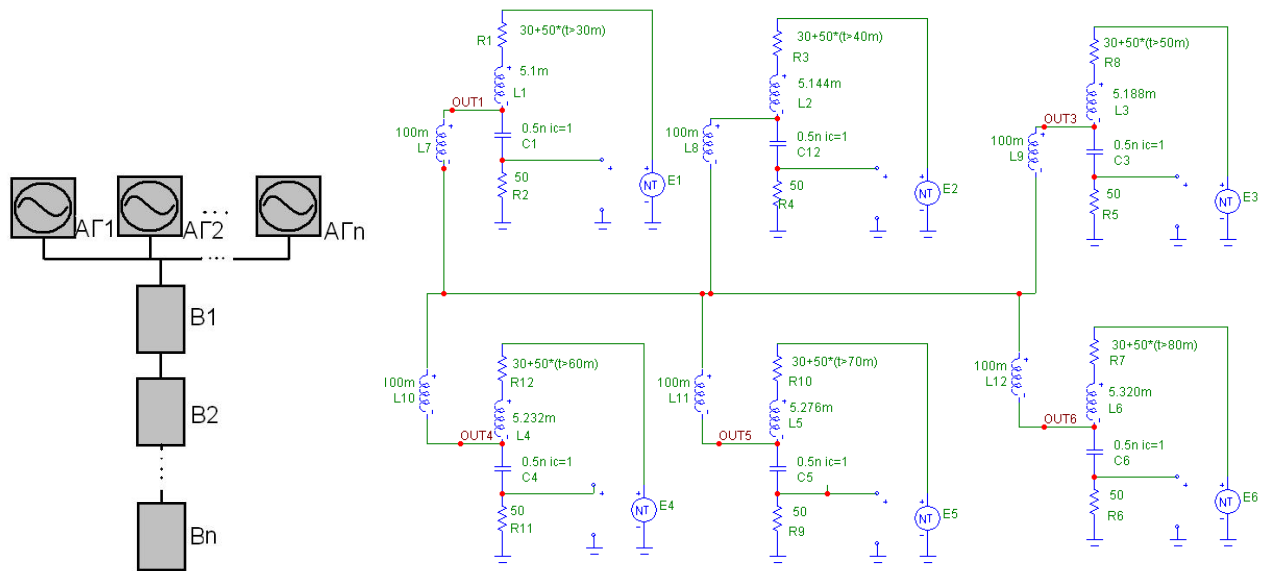


Рисунок 5 – Расчетные нагрузочные характеристики для дифференциального варианта МЭ ПРД уровня, построенные при различных обобщенных параметрах колебательной системы датчика.

На рисунках 6 и 7 приведены результаты имитационного моделирования режимов работы многогенераторного варианта МЭ ПРД уровня.



АГ – автогенератор; В – вибратор

Рисунок 6 – Структурная схема многоосцилляторного варианта МЭ ПРД и его ЭЭСЗ.

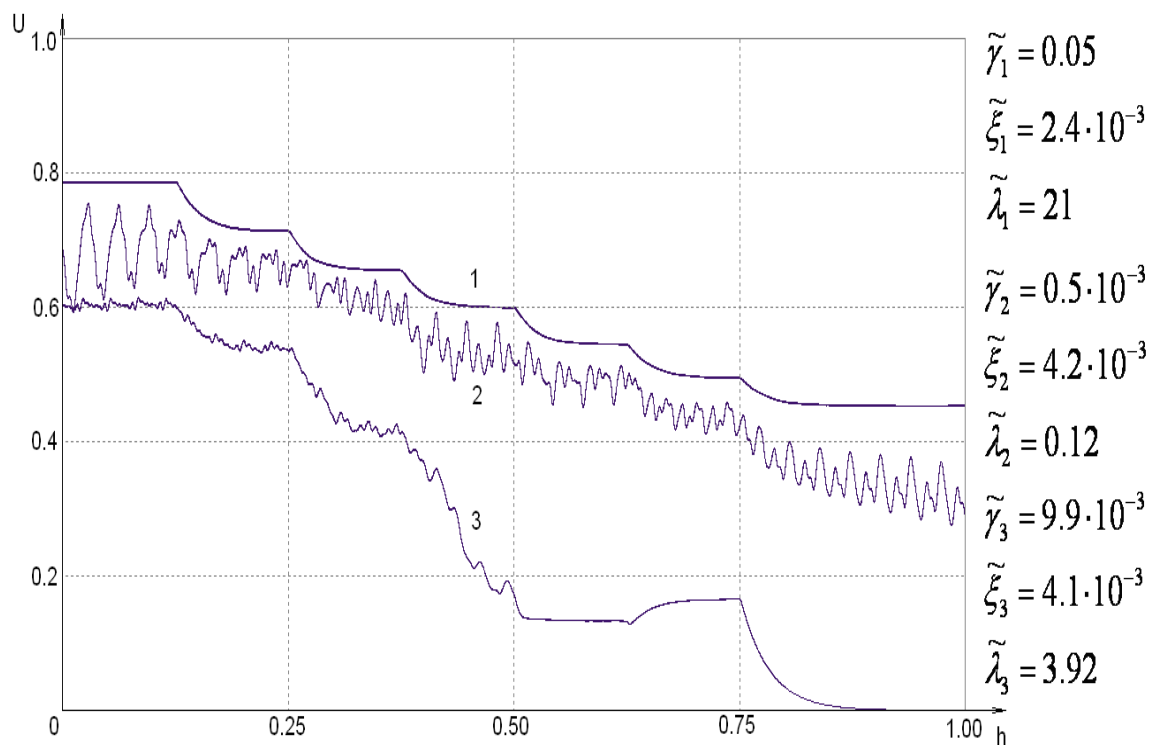


Рисунок 7 – Расчетная нагрузочная характеристика МЭ ПРД для трех вариантов значений обобщенных параметров колебательной системы датчика.

Результаты имитационного моделирования режимов работы различных вариантов конструктивного исполнения МЭ ПРД, показали, что использование в конструкции датчика большого числа пьезорезонаторов и вибраторов, позволяет существенно расширить диапазон измеряемых уровней сыпучих материалов. Например, при реализации режима сильной связанности в системе рабочий диапазон датчика увеличивается практически пропорционально числу используемых пьезорезонаторов, возбу-

ждаемых в режиме автоколебаний, но чувствительность измерений при этом существенно снижается.

В итоге по результатам имитационного моделирования режимов работы МЭ ПРД были сделаны следующие выводы:

- увеличение в чувствительном элементе датчика числа вибраторов и пьезорезонаторов, возбуждаемых в режиме автоколебаний, позволяет существенно расширить диапазон измеряемых значений уровня сыпучих материалов, обеспечить плавность выходной характеристики датчика, повысить точность и надежность измерений;

- одnogенераторную схему колебательной системы датчика с сильной связанностью между парциальными системами рекомендуется использовать для измерения малых и средних диапазонов уровней сыпучих материалов;

- двухгенераторная схема МЭ ПРД уровня может быть использована для создания дифференциального варианта датчика с повышенными метрологическими характеристиками, применимого для тяжелых условий эксплуатации;

- многогенераторная схема датчика представляет собой сложный многофункциональный преобразователь, характеризующийся большим разнообразием нагрузочных характеристик, способов формирования выходного сигнала датчика.

При этом было также установлено, что МЭ ПРД характеризуются наличием гистерезиса, проявляют механизмы адаптации к изменяющимся входным параметрам, динамические процессы в них протекают с учетом предыстории процесса и т.п. Из этого можно сделать вывод о том, что многоосцилляторные первичные преобразователи могут быть использованы не только непосредственно для целей измерения физических величин, но также и для осуществления первичного функционального преобразования измерительных сигналов. Это позволит расширить функциональные возможности и область практического применения МЭ ПРД.

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований и практической реализации макета МЭ ПРД уровня сыпучих материалов.

При разработке первичных преобразователей данного типа необходимо обеспечить согласование параметров взаимодействующих резонаторов между собой, с элементом акустической связи и с измеряемой средой. Для этой цели рекомендуется использовать следующую упрощенную методику расчета основных конструктивных параметров МЭ ПРД.

Величину механической добротности колебательной системы датчика ( $Q$ ) можно оценить, используя значение коэффициента затухания акустических колебаний в материале вибратора ( $\alpha$ ):

$$Q \approx K \cdot \frac{1}{\alpha},$$

где  $K$  – конструктивный параметр датчика, зависящий от геометрической формы вибраторов, способов их соединения и крепления.

Максимально допустимое значение обобщенной относительной расстройки частот ( $\zeta$ ) взаимодействующих вибраторов можно определить по формуле:

$$\zeta < \frac{1}{Q}.$$



Минимально допустимое значение коэффициента акустической связи между взаимодействующими вибраторами можно определить с использованием упрощенной формулы:

$$\tilde{\gamma} > \frac{1}{Q}.$$

Минимально допустимое сечение элемента акустической связи определяется с учетом значений механической добротности колебательной системы датчика и величины поперечного сечения вибратора:

$$\frac{S_{\tilde{N}}}{S_A} > \frac{1}{Q},$$

где  $S_B, S_{\text{эс}}$  – площади поперечных сечений вибратора и элемента связи.

Длину рабочей части датчика (цепочки, состоящей из вибраторов и элементов акустической связи между ними) рекомендуется выбирать, используя соотношение:

$$L < \lambda \cdot Q,$$

где  $\lambda$  – длина звуковой волны в материале;

$Q$  – механическая добротность колебательной системы датчика.

Длину единичного звена, включающего в себя вибратор и элемент акустической связи, необходимо выбирать из условия обеспечения режима стоячей волны как во всей системе в целом, так и в ее отдельных частях:

$$l = \frac{L}{N},$$

$N$  – количество звеньев в цепи, состоящей из вибраторов и элементов связи между ними.

При изготовлении макета МЭ ПРД уровня сыпучих материалов в качестве чувствительного элемента датчика использовалась цепочка из шести последовательно соединенных с помощью гибких элементов связи металлических пластин (рисунок ...).

Возбуждение колебаний в системе осуществлялось с использованием пьезоэлемента, включенного по схеме пьезотрансформатора, на частоте, соответствующей четной моде продольных колебаний вибраторов (рисунок 9).

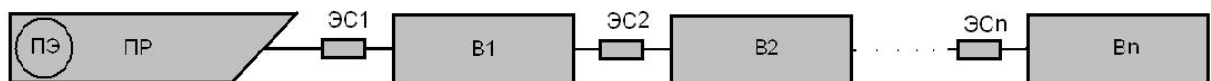


Рисунок 9 – Конструкция чувствительного элемента МЭ ПРД уровня (ПЭ - пьезоэлемент, В- вибратор, ПР – составной пьезорезонатор, ЭС – элемент акустической связи между вибраторами).

В таблице 1 приведены значения резонансных частот и амплитуд колебаний вибраторов.

Таблица 1. – Значения резонансных частот и амплитуд колебаний вибраторов, и коэффициенты взаимодействия между ними

№ вибратора	Резонансная частота пятой моды продольных колебаний вибратора, кГц	Амплитуда пятой моды продольных колебаний вибратора, В	Коэффициент взаимодействия колебательной системы
1	58,18	600	0,15
2	57,9	600	0,33
3	58,9	600	0,17
4	56,7	700	0,07
5	57,6	1100	0,91
6	57,4	500	1,51

На основе экспериментальных данных были рассчитаны усредненные характеристики колебательной системы МЭ ПРД:

$f_{cp} \approx 57,78$  – усредненная частота колебательной системы датчика (кГц);

$\Delta\tilde{f} \approx 0,745$  – среднеквадратическое отклонение частот (кГц);

$\xi \approx 0,013$  – относительная усредненная расстройка частот колебательной системы датчика;

$\tilde{\gamma} \approx 0,1$  – усредненный коэффициент связи колебательной системы датчика;

$\tilde{\aleph} \approx 0,1$  – обобщенная расстройка амплитуд колебаний вибраторов;

$\tilde{\lambda} \approx 0,76$  – значение обобщенного коэффициента взаимодействия колебательной системы датчика.

Как следует из приведенных расчетов, в колебательной системе разработанного однопериодного варианта МЭ ПРД реализуется режим сильно связанных колебаний вибраторов, что позволяет использовать его для измерения средних значений уровней сыпучих материалов.

Проведенные экспериментальные исследования макета разработанного МЭ ПРД уровня сыпучих материалов подтвердили результаты теоретических исследований: При этом было установлено, что чувствительность и рабочий диапазон датчика зависят не только от соотношения его обобщенных параметров (расстройки собственных частот и амплитуд колебаний вибраторов и резонаторов, величины акустической связи между ними), но и от физико-механических характеристик контролируемой среды. В результате взаимодействия вибраторов с измеряемой средой происходит изменение механического импеданса колебательной системы датчика, что сопровождается изменением амплитуды колебаний вибраторов, парциальных частот и коэффициентов взаимодействия между ними.

В качестве выходного сигнала датчика было использовано выходное напряжение, снимаемое с генераторной обкладки возбуждающего пьезотрансформатора. Зависимость выходного напряжения датчика от величины измеряемого уровня сыпучего материала имеет достаточно линейный вид и в первом приближении может быть аппроксимирована в виде упрощенной формулы:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ex}} (1 \pm a \cdot H),$$

где  $a$  – конструктивный параметр колебательной системы датчика,  
 $H$  – измеряемый уровень сыпучего материала.

Разработанное устройство было внедрено на предприятиях зерноперерабатывающей промышленности г. Барнаула.

### Основные выводы и результаты исследований

1. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были разработаны принципы построения МЭ ПРД, основанные на использовании связанных колебаний в сложных колебательных системах первичных измерительных преобразователей, что позволило развить научно-технические основы построения, осуществить разработку и внедрение датчиков уровня сыпучих материалов с расширенным диапазоном измерения.

2. Выработаны рекомендации по рациональному использованию режимов связанных колебаний в сложных динамических системах многоэлементных первичных измерительных преобразователей. При этом было установлено, что:

- реализация режима сильной связанности между отдельными степенями свободы колебательной системы первичного измерительного преобразователя позволяет использовать протяженные линии акустической связи между пьезорезонаторами и удаленными вибраторами с целью расширения диапазона измеряемых уровней сыпучих материалов;

- применение режима сильной связанности между отдельными парциальными колебательными системами многоэлементного датчика уровня сыпучих материалов позволяет линеаризовать его выходную характеристику;

- реализация режима слабой связанности между отдельными парциальными системами позволяет повысить чувствительность выходной характеристики многоэлементного датчика уровня;

- использование режимов связанных колебаний в сложных динамических системах многоэлементных датчиков, позволяет расширить их функциональные возможности.

3. С использованием метода имитационного моделирования исследованы и экспериментально подтверждены особенности реализации режимов связанных колебаний в сложных динамических системах многоэлементных датчиков вибрационного типа. При этом было установлено:

- повышение чувствительности МЭ ПРД приводит к увеличению времени переходных процессов в колебательной системе датчика, что обуславливает снижение его быстродействия;

- при разработке конструкции многоэлементного первичного измерительного преобразователя с целью расширения диапазона измеряемых уровней сыпучих материалов рекомендуется увеличивать акустическую связь между вибраторами и пьезорезонаторами, уменьшать расстройку их собственных частот;

- выходные характеристики многоэлементных первичных измерительных преобразователей характеризуются наличием гистерезиса, величина которого пропорциональна степени взаимодействия между парциальными колебательными системами датчика.

4. На основе проведенных исследований были разработаны и внедрены опытные образцы МЭ ПРД уровня сыпучих материалов. Отличительными особенностями разработанного датчика уровня сыпучих материалов от существующих аналогов являются:

- расширенный диапазон измерения уровня сыпучих материалов (зависит от свойств рабочей среды и может составлять от единиц до десятков метров);
- обеспечение линейности и плавности выходной характеристики многоэлементного датчика вибрационного типа;
- применимость разработанного типа МЭ ПРД уровня сыпучих материалов в условиях сильной запыленности, наличия механических и тепловых воздействий на чувствительный элемент датчика.

### **Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:**

*Статьи в изданиях рекомендованных ВАК РФ для представления основных научных результатов кандидатской диссертации.*

1. Балыков А.В., Седалищев В.Н. Многоэлементный пьезорезонансный датчик уровня сыпучих материалов / Естественные и технические науки – 2010 – № 6 – С.
2. Балыков А.В. Разработка многоэлементных измерительных устройств с использованием связанных колебаний пьезорезонаторов / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, А.С. Назаров, А.А. Тятюхин /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский вестник №2. ВИС-2010. – С. 48-51.

*Статьи в других изданиях.*

3. Балыков А.В. Амплитудно-частотные характеристики пьезорезонансных нейрноподобных измерительных преобразователей / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2009. – С. 161 – 163.
4. Балыков А.В. Информационный критерий эффективности измерительных устройств / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2009. – С. 164 – 169.
5. Балыков А.В. Применение нелинейных принципов получения первичной измерительной информации с использованием связанных колебаний осцилляторов как одно из направлений интеллектуализации средств измерений / А.В. Балыков /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2009. – С. 6 – 10.
6. Балыков А.В. Перспективы создания устройств с нечеткой логикой на основе реализации взаимосвязанных колебаний в системах с конечным числом свободы. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №3. ВИС-2007. – С. 19 – 21.
7. Балыков А.В. Принципы построения акустических измерительных устройств с использованием связанных колебаний в системах с распределенными параметрами. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №3. ВИС-2007. – С. 87 – 89.

8. Балыков А.В. Применение статистических методов нелинейного оценивания для определения обобщенных параметров осцилляторных нейроноподобных измерительных устройств. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, А.С. Малых, А.С. Назаров, А.А. Тятюхин /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 33 – 37.
9. Балыков А.В. Разработка методов анализа и синтеза осцилляторных нейроноподобных измерительных устройств, основанных на использовании взаимодействующих пьезорезонаторов. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, А.С. Малых, А.С. Назаров, А.А. Тятюхин /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 43 – 49.
10. Балыков А.В., Седалищев В.Н., Тицнер А.О. Перспективность построения осцилляторных нейроноподобных устройств обработки измерительной информации. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 70 – 71.
11. Балыков А.В. Экспериментальные исследования пьезотрансформаторного нейроноподобного измерительного устройства. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, А.С. Малых, А.С. Назаров, А.А. Тятюхин /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 81 – 84.
12. Балыков А.В. Принципы построения и области применения интеллектуальных измерительных устройств, основанных на использовании связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев, А.С. Малых, А.С. Назаров, А.А. Тятюхин /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 93-95.
13. Балыков А.В. Анализ принципов построения пьезорезонансных датчиков, основанных на использовании связанных колебаний. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 104.
14. Балыков А.В. Оптимизация размеров элементов акустической связи измерительных устройств, основанных на использовании связанных колебаний в системах с распределенными параметрами. / А.В. Балыков, А.О. Тицнер, В.Н. Седалищев /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2008. – С. 105 – 106.
15. Балыков А.В., Седалищев В.Н., Тицнер А.О. Разработка методов анализа осцилляторных нейроноподобных измерительных устройств, основанных на использовании взаимодействующих пьезорезонаторов. Сборник статей международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» г. Пенза, 2010 С. 191 - 193
16. Балыков А.В., Седалищев В.Н., Тицнер А.О. Разработка интеллектуального пьезорезонансного устройства контроля уровня сыпучих материалов с использованием протяженных линий акустической связи. Сборник статей международной научно-технической конференции «Информационно-вычислительные технологии и их приложения» г. Пенза, 2010 С. 134 - 135
17. Балыков А.В., Седалищев В.Н., Тицнер А.О. Моделирование акустических измерительных устройств с использованием связанных колебаний в системах с распределенными параметрами. Сборник материалов конференции «ИКИ – 2008», С. 68-69

18. Балыков А.В., Седалищев В.Н., Тицнер А.О. Возможность построения устройств с нечеткой логикой на основе реализации связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы. Сборник материалов конференции «ИКИ – 2008», С. 56-58.

19. Балыков А.В. Разработка высокочувствительного многоэлементного пьезорезонансного датчика для измерения больших значений уровней сыпучих материалов. /– Барнаул: Изд-во АлтГТУ / Ползуновский альманах №2. ВИС-2010. – С. 91 – 92.



