

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОПОДОБНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

**А. В. Балыков, А. С. Малых, А. С. Назаров, В. Н. Седалищев,
С. Е. Сорокин, А. О. Тицнер, А. А. Тятюхин**

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
г. Барнаул

Совершенствование приборов и методов измерения параметров технологических процессов связано с необходимостью решения большого комплекса как научно-технических, так и организационных вопросов. При этом одной из важнейших является проблема повышения эффективности средств измерений за счет улучшения метрологических, технических и эксплуатационных характеристик первичных преобразователей и приборов на их основе. Повышению эффективности средств измерений служит и осуществляемая в настоящее время интеллектуализация измерительного процесса. Под понятием интеллектуализации процессов получения и обработки измерительной информации подразумевается большой круг задач, направленных на повышение надежности, точности, быстродействия не только измерительных устройств, но и устройств передачи и обработки измерительной информации. Приближение процесса обработки результатов измерений непосредственно к объекту измерений за счет создания специальных интеллектуальных датчиков, устройств передачи и обработки измерительной информации, основанных на широком использовании микропроцессорной техники, современных программных средств позволяет существенно повысить качество измерительного процесса.

Дальнейшее совершенствование измерительной техники, очевидно, пойдет по пути широкого применения нейросетевых технологий, предназначенных для получения, передачи и обработки измерительной информации. Такие измерительные устройства нового поколения будут иметь более высокую способность адаптации к изменяющимся условиям, способность к самообучению. Этого можно достичь за счет широкого внедрения в измерительную технику достижений из области разработки искусственного интеллекта. При этом необходимо отметить, что в основу создания таких устройств могут быть положе-

ны принципы перехода от четкой программируемости их поведения в направлении приближения к принципам функционирования живых систем. К числу таких систем можно отнести осцилляторные нейронные сети (ОНС) [3]. При этом в качестве сложных динамических систем могут выступать ансамбли взаимодействующих первичных измерительных преобразователей осцилляторного типа. Это могут быть, например, устройства, состоящие из взаимодействующих пьезорезонансных датчиков, электромагнитных контуров, лазеров и других первичных преобразователей, реализующих в своих структурах колебательные и волновые процессы [1, 3, 4].

В настоящее время для высокочувствительных измерений все более широкое применение находят резонансные методы. Для этой цели чаще всего используют автоколебательные процессы в системах различной физической природы. Существует ряд методов подхода к анализу процессов в таких автоколебательных устройствах. Но даже при всем многообразии существующих методов анализа динамических процессов в сложных колебательных системах до настоящего времени не разработаны теоретические основы создания пьезоэлектрических измерительных устройств, основанных на использовании связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы [2].

Конструктивно такие устройства могут состоять из достаточно большого числа акустически и электрически связанных пьезорезонаторов. При этом в качестве элемента акустической связи между взаимодействующими степенями свободы может выступать непосредственно и сама измеряемая среда. Трудности аналитического исследования таких датчиков связаны с тем, что электромеханический резонатор является сложной колебательной системой, в которой могут возбуждаться различные моды и виды колебаний при различных типах связей между ними.

Эквивалентная электрическая схема замещения таких устройств имеет достаточно сложный вид и может состоять из большого числа взаимодействующих между собой контуров. Физические процессы в таких автоколебательных ансамблях описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений, но в большинстве случаев возможно только приближенное решение таких систем уравнений. При этом вводятся те или иные допущения в зависимости от особенностей колебательных систем и задач, которые ставятся при их исследовании.

Сложность и особенности теоретического анализа колебаний в таких системах в значительной степени зависят от числа степеней свободы. Не решают проблемы и применение современных компьютерных технологий для исследования динамических процессов в столь сложных колебательных системах. При использовании традиционного подхода, основанного на применении математических моделей объекта в виде системы дифференциальных уравнений, порядок которых соответствует числу степеней свободы, вычислительный процесс требует значительного машинного времени и может составлять десятки часов даже для несложных систем. Полученные при этом результаты трудно использовать для решения конкретных вопросов по оптимизации конструкции устройств и режимов их работы. Также определенные неудобства, как для анализа режимов связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы, так и для разработки конкретных конструкций соответствующих устройств на их основе, представляет отсутствие обобщенного критерия, характеризующего степень взаимосвязи отдельных осцилляторов, определяющего возможные режимы работы таких устройств.

Сложность математического аппарата, описывающего динамические процессы в сложных нелинейных системах, вызвана также стремлением авторов представить динамические процессы от момента возбуждения колебаний до подхода системы к установившемуся режиму, определить устойчивость колебаний, описать переходные процессы в системе. При решении таких задач используют определённые упрощения физических моделей колебательных систем и их математических моделей. В первом случае не учитывают наличие большого числа степеней свободы, характерных для реальных объектов, и обуславливающих наличие целого спектра различных типов колебаний. При этом выде-

ляют только основные, доминирующие типы колебаний, а при изготовлении устройств обеспечивают моночастотность колебаний, применяют специальные меры по исключению взаимодействий между отдельными степенями свободы. Например, используют акустическую и гальваническую развязку между электромеханическими колебательными системами.

При анализе режимов связанных колебаний классическими методами рассматриваются лишь основы теории синхронизации и не затрагиваются, например, вопросы неустойчивости колебаний, перескоков фазы и частот колебаний, не исследуются реальные колебательные системы; не оцениваются режимы работы таких устройств с метрологическими позициями.

В связи с этим, одним из основных препятствий разработки и широкого внедрения измерительных устройств, основанных на использовании динамических процессов в сложных многоосцилляторных системах, является отсутствие теоретических основ, методик проектирования и расчета таких устройств.

Теоретической основой решения этой задачи может послужить разработка упрощенной математической модели колебательной системы с конечным числом степеней свободы. Такая математическая модель должна отражать специфику статических и динамических процессов, возникающих в сложных колебательных системах, давать количественную характеристику процессов, описывать их в функции времени, они также должны быть удобными для инженерной практики. В свою очередь, эквивалентные электрические схемы замещения таких устройств должны содержать контуры, цепи, отражающие реальные процессы и режимы работы устройств.

Решению поставленной задачи может послужить использование метода «условных контуров», разработанного первоначально применительно для анализа режимов связанных колебаний в системах с двумя степенями свободы [2]. В основу данного метода положен принцип представления режимов связанных колебаний в системах с конечным числом степеней свободы с использованием условных эквивалентных контуров: усредненного и дифференциального.

Основная идея данного метода заключается в том, что высокочастотная и низкочастотная составляющие полной энергии системы, представляются сосредоточенными

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

в отдельных условных контурах. Согласно данной концепции, колебательная система любой сложности может быть представлена в виде двух обобщенных, не связанных между собой эквивалентных электрических схем замещения. Причем, в высокочастотном контуре сосредотачивается неизменяемая во времени часть энергии колебательной системы, а в низкочастотном – энергия небаланса. Переменная составляющая полной энергии системы соответствует энергии взаимообмена между отдельными парциальными подсистемами и пропорциональна разности энергии этих подсистем. При этом можно отдельно выделить активную и реактивную компоненты энергии небаланса. Отличие между ними заключается в том, что активная составляющая энергии небаланса в системе накапливается в одном из контуров, а реактивная составляющая не приводит к долговременному перераспределению колебательной энергии между парциальными подсистемами, то есть является как бы реактивной составляющей энергии взаимодействия. Тогда асинхронный режим связанных колебаний в системе можно представить как преобладание реактивной составляющей энергии небаланса в колебательной системе, а синхронизм, наоборот, как результат преобладания активной составляющей энергии небаланса в системе.

Колебательный контур, в котором сосредоточена энергия взаимообмена колебательной системы, может содержать как активные, так и реактивные элементы. С помощью данных обобщенных компонент удобно производить упрощенный анализ динамики поведения сложной колебательной системы.

Эквивалентная электрическая схема замещения такого контура может включать в себя накопительные элементы (L_{Δ}, C_{Δ}), источник ЭДС, а также активное сопротивление (R_{Δ}), характеризующее уровень взаимодействия между контурами. Таким образом, колебательная система любой сложности может быть представлена в упрощенном виде системой из двух условных эквивалентных электрических схем замещения (ЭЭСЗ).

Достоинством такого подхода к анализу связанных колебаний в сложных системах является то, что для сигнала, генерируемого системой любой сложности, всегда можно выделить неизменяемую составляющую и переменную составляющую.

Можно провести аналогию между анализом режимов связанных колебаний в сложных колебательных системах с большим числом

взаимодействующих осцилляторов и статистическим подходом к анализу зашумленных сигналов в измерительных устройствах. При этом понятию математического ожидания и среднего квадратичного отклонения случайной величины можно привести в соответствие значения амплитуд синхронизированных колебаний в обобщенном контуре и усредненный разброс амплитуд колебаний отдельных осцилляторов, характеризующийся энергией, сосредоточенной в дифференциальном контуре. Для описания таких процессов можно использовать понятие гиперплоскости. При статистическом подходе среднеквадратическое рассеяние амплитуды связанных колебаний в системе характеризуется шириной АЧХ колебательной системы. Добротность такой системы зависит от степени связи между парциальными контурами.

Совместное использование двух условных эквивалентных контуров позволяет упорядочить анализ сложных колебательных систем, оптимизировать и упростить разработку конструкции измерительных преобразователей данного типа. В основу замены сложной системы более простой, отражающей процессы, происходящие в исходной системе, положены следующие упрощенные аналитические зависимости, выраженные с использованием статистических оценок обобщенных параметров колебательной системы:

$$\begin{cases} \tilde{x} = \tilde{A}(t) \cdot \cos[\tilde{\omega}t - \varphi(t)] \\ \tilde{A}(t) = A_0 + \frac{\tilde{\gamma}\tilde{\omega}}{2\tilde{\Omega}} \cdot \tilde{B}(t) \sin \tilde{\Omega}t; \\ \tilde{\Omega} = \Delta\tilde{\omega}\sqrt{1 - \tilde{\lambda}^2} \end{cases}$$

$$\tilde{\lambda} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \tilde{\omega} \cdot \tilde{S}}{\Delta\tilde{\omega}} = \frac{\tilde{\gamma} \cdot \Delta\tilde{A}}{\Delta\tilde{\omega} \cdot \tilde{A}}; \quad \tilde{\omega} \approx \frac{\sum \omega_i}{n};$$

$$\Delta\tilde{\omega} = \sqrt{\frac{\sum (\omega_i - \tilde{\omega})^2}{n}}; \quad \Delta\tilde{A} = \sqrt{\frac{\sum (A_i - \tilde{A})^2}{n}}.$$

Таким образом, используя данные формулы, можно произвести переход от сложной системы, состоящей из большого числа взаимодействующих осцилляторов, к системе, состоящей из двух эквивалентных условных контуров. Причем колебания в одном из них происходят с усредненной для всей колебательной системы средневзвешенной частотой ($\tilde{\omega}$), а во втором контуре - на обобщенной, среднестатистической частоте расстройки отдельных контуров между собой.

Представление сложной динамической системы, основанное на выделении в отдельные колебательные контуры неизменной и изменяющейся компоненты энергии системы, позволяет, например, отдельно рассматривать синхронную и асинхронную составляющую связанных колебаний в системе. Это позволяет существенно упростить анализ и синтез, в частности, осцилляторных нейроноподобных измерительных устройств (ОНИУ), выполнить их классификацию по реализуемым режимам работы. Анализ динамики сложной колебательной системы можно свести к анализу процессов в простейшей ЭЭСЗ колебательной системы, состоящей из двух обобщенных условных контуров: высокочастотного и низкочастотного.

Для получения обобщенной ЭЭСЗ дифференциального контура, отражающего процессы взаимодействия осцилляторов между собой, используется относительная система координат. Это позволяет осуществить переход от абсолютных координат к их разности (усредненной расстройке амплитуд в ансамбле осцилляторов). В результате этого, по величине среднеквадратических отклонений параметров системы относительно их усредненных величин можно определить значения усредненных разбросов напряжений и токов в парциальных контурах, усредненные значения разбросов эквивалентных емкостей (C_{ω}) и индуктивностей (L_{ω}), усредненные значения разбросов собственных частот контуров (ω_{ω}), обобщенных относительных расстройок частот ($\tilde{\xi}$), амплитуд и фаз колебаний, а также усредненное значение коэффициентов связи между контурами ($\tilde{\gamma}$). Используя эти усредненные данные можно построить условный эквивалентный обобщенный дифференциальный контур.

Например, значение эквивалентной индуктивности дифференциального контура можно определить с использованием следующих приближенных формул:

$$L_{\omega} \approx \frac{\tilde{L}^2}{\Delta \tilde{L}} \approx \frac{\tilde{L}}{\tilde{\xi}_L}, \quad \tilde{\xi}_L = \frac{\Delta \tilde{L}}{\tilde{L}} \approx \sqrt{\frac{\sum (L_i - \tilde{L})^2}{n}}.$$

Очевидно, что для определения эквивалентной емкости дифференциального контура необходимо использовать усредненное рассеяние напряжений на электрических емкостях отдельных контуров. После соответствующих преобразований можно получить:

$$C_{\omega} \approx \frac{\tilde{C}}{\tilde{\xi}_C}, \quad \tilde{\xi}_C = \frac{\Delta \tilde{C}}{\tilde{C}} \approx \sqrt{\frac{\sum (C_i - \tilde{C})^2}{n}}.$$

Величины $\tilde{\xi}_L$ и $\tilde{\xi}_C$ характеризуют относительные расстройки индуктивностей и емкостей взаимодействующих контуров и определяют в итоге обобщенную расстройку их парциальных частот ($\tilde{\xi} = \tilde{\xi}_L + \tilde{\xi}_C$).

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

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

При равенстве амплитуд колебаний в парциальных системах полоса синхронизации равна нулю. Добротность условного дифференциального контура можно определить, используя следующие соотношения:

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

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

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

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

$$\Delta \tilde{\omega} = \frac{1}{\sqrt{(\tilde{L} - \Delta \tilde{L}) \tilde{C}}} - \frac{1}{\sqrt{\tilde{L}(\tilde{C} + \Delta \tilde{C})}} = \frac{1}{\sqrt{\tilde{L} \cdot \tilde{C}}} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \tilde{\xi}_L}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \tilde{\xi}_C}} \right) \approx \tilde{\omega} \cdot \left(\frac{1}{2} \tilde{\xi}_L + \frac{1}{2} \tilde{\xi}_C \right) \approx \tilde{\omega} \cdot \tilde{\xi},$$

а с другой стороны:

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

Таким образом, согласно предложенному методу условных контуров, колебания в системе ОНИУ любой сложности могут быть представлены в виде высокочастотных колебаний, промодулированных низкочастотной составляющей.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

При возбуждении колебаний в системе от одного источника энергии в установившемся режиме во всех степенях свободы системы колебания совершаются только на общей синхронизированной частоте, соответствующей частоте усредненного контура. При возбуждении взаимодействующих контуров от отдельных генераторов в системе возможна реализация не только синхронного, но и асинхронного режима, что будет соответствовать появлению режима автоколебаний в дифференциальном контуре.

Таким образом, при возбуждении осцилляторов в режиме свободных колебаний (или в режиме автоколебаний), условный контур разбаланса будет содержать эквивалентные индуктивность и емкость, то есть будет представлять собой колебательный контур (полосовой или заграждающий фильтры).

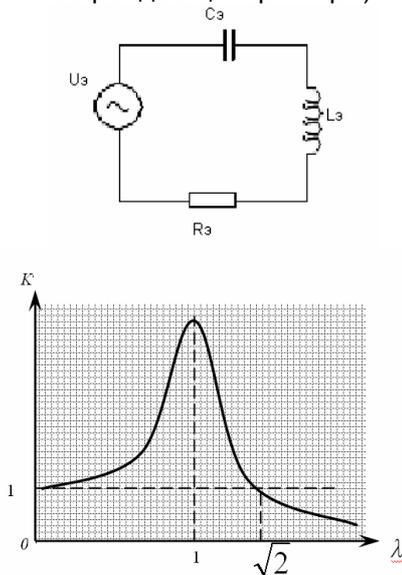


Рисунок 1 – ЭЭСЗ условного дифференциального контура и зависимость коэффициента относительной чувствительности колебательной системы от уровня взаимодействия между ее парциальными подсистемами

Эквивалентный дифференциальный контур будет отражать характер протекающих динамических процессов в сложной колебательной системе. Например, при слабом уровне взаимодействия между отдельными осцилляторами ($\tilde{\lambda} < \sqrt{2}$) в определенных областях колебательной системы будут устанавливаться высокочувствительные режимы связанных колебаний, в то время, как в других ее областях могут реализоваться режимы более сильных или, наоборот, еще более слабых взаимодействий между отдельными

осцилляторами. Все это приведет к тому, что в окрестностях режима бифуркации связанных колебаний реализуется, неустойчивый высокочувствительный режим работы датчика.

В случае воздействия на сложную систему в режиме вынужденных колебаний (используется один генератор) отдельные ее области могут быть представлены также в виде обобщенных условных дифференциальных контуров. При этом они будут содержать только по одному реактивному элементу – эквивалентные индуктивность или емкость, а вся колебательная система выступить в роли фильтров высокочастотных или низкочастотных колебаний.

В такой колебательной системе не будет появляться отдельно существующих, осциллирующих по своим внутренним законам кластеров, так как все осцилляторы или ансамбли осцилляторов синхронизированы с помощью только одного генератора. Очевидно, что на основе таких колебательных систем невозможно создавать высокочувствительные устройства для получения и обработки измерительной информации, так как коэффициент относительной чувствительности такой системы будет являться функцией обобщенного коэффициента связанности (σ) системы и никогда не превысит значение равное единице.

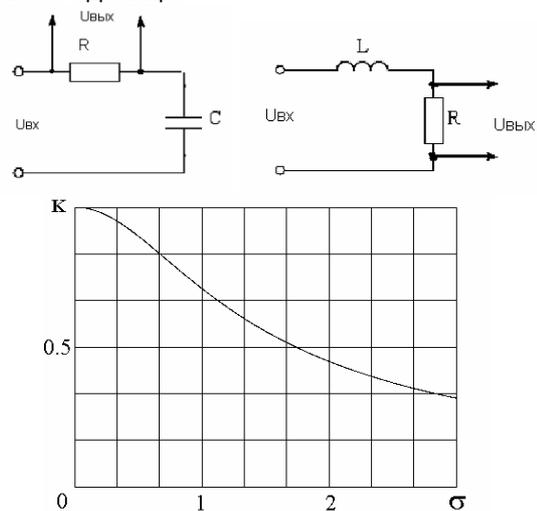


Рисунок 2 – ЭЭСЗ обобщенного дифференциального контура системы, возбуждаемого от одного генератора и зависимость коэффициента относительной чувствительности от уровня связанности парциальных подсистем

В реальных условиях работы ОНИУ неустойчивость параметров связанных колеба-

ний, появляющаяся в результате флуктуаций и внешних помех в окрестностях высокочувствительного режима бифуркации связанных колебаний, может существенно превышать погрешности расчета и моделирования динамики процессов связанных колебаний. Поэтому применение уточненных методов и моделей связанных колебаний может быть оправданно только для целей теоретического анализа.

Используя метод условных контуров, можно провести аналогию между характером протекания динамических процессов в колебательной системе с большим числом степеней свободы и режимами колебаний в условных, обобщенных осцилляторах.

Например, высокочувствительному режиму бифуркации связанных колебаний в сложной системе ($\tilde{\lambda} \approx 1$) соответствует режим апериодический режим колебаний в дифференциальном условном колебательном контуре. Линейному режиму работы полностью синхронизированной колебательной системы ($\tilde{\lambda} \approx \sqrt{2}$), соответствует апериодический процесс в таком условном контуре.

Высокочувствительный бифуркационный режим связанных колебаний в сложной динамической системе может быть использован для создания высокочувствительных устройств контроля. Для создания измерительных устройств дифференциального типа, характеризующихся высокой линейностью процесса измерительного преобразования, лучше всего использовать синхронный режим взаимодействия осцилляторов в окрестностях значений $\tilde{\lambda} = \sqrt{2}$. Линейный режим измерительного преобразования может быть достигнут и при отсутствии взаимодействий между отдельными осцилляторами ($\tilde{\lambda} = 0$) или ($\tilde{\sigma} = 0$), но практически реализовать данное условие в большинстве случаев является достаточно сложной технической задачей. Например, для достижения данной цели при создании дифференциальных измерительных устройств осцилляторного типа принимают дополнительные меры по обеспечению их электромагнитной и акустической развязки. Таким образом, в качестве кардинального решения данной проблемы может служить не исключение взаимодействия парциальных колебательных систем друг на друга, а оптимизация их взаимного влияния.

Особый интерес вызывает возможность использования в сложных колебательных системах режима сильносвязанных колеба-

ний ($\tilde{\lambda} > \sqrt{2}$). Реализация режима сильносвязанных колебаний между удаленными осцилляторами позволяет вынести часть колебательной системы ОНИУ из зоны сильного воздействия дестабилизирующих факторов. Это позволит создавать высокочувствительные устройства контроля параметров технологических процессов, способные надежно функционировать в тяжелых условиях эксплуатации.

Таким образом, на основании анализа режимов связанных колебаний в сложных динамических системах можно сделать следующие выводы.

- Осцилляторные измерительные устройства с однопериодической схемой возбуждения не могут обеспечивать повышение чувствительности измерений за счет реализации режимов связанных колебаний в сложных системах. Областью практического использования колебательных систем, возбуждаемых от одного генератора, может явиться создание измерительных устройств дифференциального типа высокой точности, но низкой чувствительности.

- Режим критического ($\tilde{\lambda} \approx \sqrt{2}$) взаимодействия может быть рекомендован для создания линейных осцилляторных измерительных устройств дифференциального типа.

- Режим сильной связанности в колебательных системах с конечным числом степеней свободы ($\tilde{\lambda} \gg 1$, $\tilde{\sigma} \gg 1$) можно использовать, например, для создания ОНИУ с разнесенными в пространстве осцилляторами.

- Режим критического взаимодействия осцилляторов в окрестностях точки бифуркации связанных колебаний ($\tilde{\lambda} \approx 1$) может быть использован для создания высокочувствительных ОНИУ.

Синхронизация отдельных осцилляторов может происходить как в фазе, так и в противофазе. При их синфазной синхронизации полная мощность системы равна сумме мощностей отдельных осцилляторов. В асинхронном режиме взаимодействий осцилляторов полная мощность системы пропорциональна корню квадратному из их общего числа.

Путем рационального использования режимов взаимодействия между отдельными степенями свободы сложных колебательных систем можно не только повысить чувствительность измерительных устройств на их основе, но и точность измерений. Это может послужить основой создания нового поколе-

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, ОСНОВАННЫХ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
ПЬЕЗОРЕЗОНАТОРОВ

ния высокочувствительных измерительных устройств, способных надежно функционировать в тяжелых производственных условиях.

Метод условных контуров удобно использовать также для упрощенного анализа динамических процессов в измерительных устройствах осцилляторного типа. Например, при ступенчатом изменении одного из параметров сложной колебательной системы переходные процессы в дифференциальном условном контуре могут быть описаны с помощью известных аналитических зависимостей для обычного колебательного контура. При этом нужно только вместо показателя, характеризующего затухание в контуре, использовать коэффициент взаимодействия колебательной системы ($\tilde{\lambda}$):

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

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

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

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

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

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

где k – номинальный коэффициент преобразования.

Можно показать, что время установления в динамической системе стационарного состояния (t_y) зависит от коэффициента

взаимодействия ($\tilde{\lambda}$) и имеет минимальное значение при $\tilde{\lambda} \approx \sqrt{2}$.

Колебательная система характеризуется максимальной чувствительностью к изменению ее параметров в окрестностях значения

$$\tilde{\lambda} \approx \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 0,7.$$

Данный критический режим асинхронных колебаний, при котором активная и реактивная составляющие энергии взаимодействия контуров сравнимы, характеризуется максимальной глубиной амплитудной модуляции связанных колебаний.

Таким образом, применение метода «условных контуров» позволяет существенно упростить математический аппарат, необходимый для описания динамических процессов в сложных колебательных системах, а в результате - упростить расчет и проектирование ОНИУ на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания: Учеб. пособие для вузов.-М.: Издательство физико-математической литературы, 2002.
2. Седалищев В.Н., Хомутов О.И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации: монография. Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006.
3. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1990 272с.
4. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.