

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

**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

Конструктивно осцилляторные нейроноподобные измерительные устройства (ОНИУ) представляют собой ансамбли взаимодействующих между собой осцилляторов. При этом в роли осцилляторов могут выступать первичные измерительные преобразователи, реализующие резонансные режимы работы, например, пьезорезонансные датчики (ПРД), а также разнообразные устройства, осцилляторного типа, предназначенные для передачи и преобразования измерительной информации (электрические колебательные контуры, оптические квантовые генераторы и т.п.).

Особенностью таких устройств является то, что процессы получения, передачи и первичной обработки измерительной информации осуществляются в них на физическом уровне, в условиях максимального приближения к объекту измерения. Это позволяет относить такие устройства к разряду интеллектуальных средств измерений.

Принцип работы таких устройств основан на реализации динамических процессов в сложных колебательных системах с конечным числом степеней свободы, что по организации и функционированию соответствует принципам построения и функционирования осцилляторных нейроноподобных систем (ОНС). Трудность в анализе и синтезе таких устройств заключается в том, что для описания физических процессов, происходящих в таких сложных динамических системах, не применимы методы лапласовского детерминизма, однозначного соответствия причины и следствия [1, 2, 5-8].

Применение методов нелинейной динамики для описания сложных колебательных процессов в ОНИУ является упрощенным подходом. Такая идеализация физической модели не позволяет производить описание эволюции системы во времени, не охватывает всех возможных вариантов, их огромное число, это непредсказуемый процесс, случайный [5-8].

В настоящее время общепринятым является представление, что технические дисциплины имеют дело с рядом достаточно точно решаемых задач. Такой детерминистский подход используется и в технике измерений. Однако практическое применение динамических методов к таким измерительным устройствам как ОНИУ, состоящим из большого числа взаимодействующих осцилляторов оказывается совершенно нереальным. Очевидно, что при анализе и синтезе таких устройств приходится отказываться от полного детерминированного описания динамических процессов, происходящих в сложных нелинейных колебательных системах. Это требует перехода к их неполному (частично детерминированному) описанию с использованием малого числа параметров, но с сохранением идеологии описания систем, близкой к динамической. При этом приходится использовать принципиально новое понятие вероятностного предсказания поведения динамических систем. Даже при использовании современных мощных суперкомпьютеров невозможно абсолютно точно рассчитать эволюцию реальных динамических систем [1, 2, 5, 6].

Таким образом, коллективное поведение сложной динамической системы не может быть сведено к чисто механическому движению, его описание должно быть построено не только с использованием детерминированных динамических подходов, а также с использованием вероятностных, статистических моделей.

Например, невозможно подобрать партию пьезорезонаторов с абсолютно идентичными характеристиками, поэтому ОНИУ на базе ПРД могут существенно отличаться друг от друга по своим характеристикам даже при использовании пьезорезонаторов из одной партии изготовления.

В связи с этим для осуществления предварительной оценки метрологических харак-

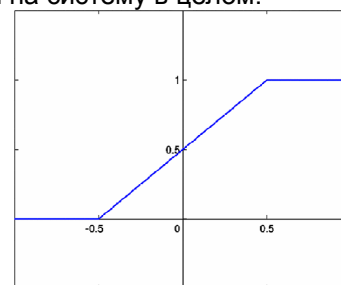
теристик ОНИУ предлагается использовать статистический подход, считая, что параметры отдельных осцилляторов являются случайными величинами. При этом закон распределения параметров осцилляторов (ЗРПО) будет являться важной характеристикой такой колебательной системы, определяющей характер и особенности динамических процессов, протекающих в ней. Знание начальных и центральных моментов ЗРПО позволит дать предварительную оценку основных характеристик контрольно-измерительных устройств на их основе (рабочий диапазон, показатель нелинейности рабочей характеристики, чувствительность, быстродействие, уровень гистерезиса и т.п.).

Использование вероятностных характеристик для описания сложных динамических систем дает возможность представлять ОНИУ в виде обобщенных эквивалентных осцилляторов. Это позволяет, в свою очередь, существенно упростить анализ и синтез таких сложных динамических систем, осуществить расчет и проектирование измерительных устройств на их основе.

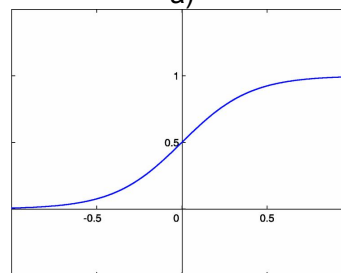
Очевидно, что для определения обобщенных параметров ОНИУ необходимо использовать методы нелинейного статистического оценивания, так как между осцилляторами осуществляется взаимодействие, что предполагает наличие определенных корреляционных связей между случайными величинами. При этом величины начальных и центральных моментов ЗРПО являются важными характеристиками колебательной системы. С их помощью можно определить не только обобщенные оценки коэффициентов относительных расстройок амплитуд и частот, усредненные значения коэффициентов связи, связанности и взаимодействия, но и оценить интервалы неопределенности для соответствующих случайных величин. Например, значение СКО коэффициента взаимодействия (связанности) будет характеризовать наклон интегральной характеристики ЗРПО, описывающей бифуркационный режим взаимодействия в системе. Крутизна наклона такой характеристики будет определять чувствительность ОНИУ.

Например, при для ЗРПО, близкого к нормальному, вид интегральной характеристики и, соответственно, вид передаточной характеристики устройства будет по форме напоминать сигмоидальную активационную характеристику нейрона (рис. 1б). На основе такого осцилляторного нейроноподобного элемента можно реализовать высокочувстви-

тельное измерительное устройство, контроллер с нечеткой логикой и т.п. При этом значение коэффициента взаимодействия будет определять ширину полосы синхронизации колебательной системы и, соответственно, ширину петли гистерезиса измерительного устройства. Экссесс и коэффициент асимметрии ЗРПО будут характеризовать, соответственно, степень взаимодействия осцилляторов между собой (ширину высокочувствительной области, ее линейность), наличие ведущих и ведомых осцилляторов, степень их влияния на систему в целом.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Разновидности функций активации осцилляторных нейроноподобных устройств: а – линейная функция активации с насыщением (при равномерном ЗРПО, линейная рабочая характеристика устройства); б – сигмоидальная функция активации (при нормальном ЗРПО, нелинейная рабочая характеристика устройства с максимальной чувствительностью в середине рабочего диапазона); в – пороговая функция активации (высокочувствительный ключевой режим работы устройства при малом рассеянии собственных частот осцилляторов)

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Таким образом, чувствительность ОНИУ, их рабочий диапазон будут определяться характеристиками законов распределения параметров используемых осцилляторов. Поэтому для оценки интервала неопределенности измеряемой величины может быть применен информационный подход с использованием энтропийного коэффициента неопределенности.

Как известно, информативность измерительного процесса можно оценить с помощью следующего соотношения:

$$I = H_1 - H_2,$$

где H_1 - неопределенность результата измерений до эксперимента, H_2 - неопределенность результата измерений после эксперимента; $H = -\int p_x \log p_x dx$ - значение энтропии системы.

Для нормального закона распределения случайных величин плотность вероятности определяется зависимостью вида:

$$p_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \ell^{\frac{1}{2} \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sigma^2}}.$$

На основании этой формулы можно произвести оценку значения апостериорной энтропии измерительного процесса:

$$H_2 = - \int_{\bar{x}-\sigma}^{\bar{x}+\sigma} p_x \log p_x dx = \ln \sqrt{2\pi\ell}\sigma = \ln 2\Delta x_s,$$

$$\Delta x_s = \sqrt{\frac{\pi\ell}{2}}\sigma, \Delta x_s = K_s \cdot \sigma = K_n \cdot a,$$

$$K_n = K_s \cdot \frac{\sigma}{a},$$

где: $K_s = \sqrt{\frac{\pi\ell}{2}} \approx 2,066$ – значение энтропийного коэффициента.

Как известно, энтропийный коэффициент (K_s) характеризует степень несоответствия равномерному ЗРПВ, то есть эта величина может быть использована для оценки степени нелинейности интегрального ЗРПО. Из этого следует, что в определенном интервале значений измеряемой величины, K_s будет определять значение коэффициента относительной чувствительности ОНИУ (рисунок 2).

Например, для в точках пересечения равномерного (линейного) и нормального дифференциальных законов распределения случайных величин коэффициент относи-

тельной чувствительности устройства равен единице. В центре интервала коэффициент нелинейности в $\sqrt{\ell}$ раз больше, а на краях в $\sqrt{\ell}$ раз меньше единицы.

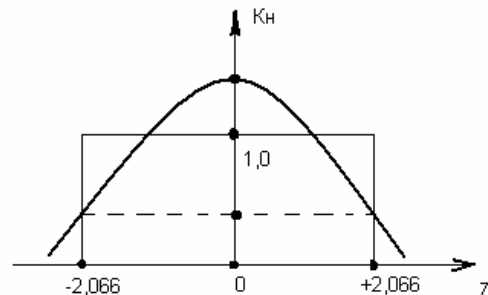


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента относительной чувствительности ОНИУ от степени рассеяния параметров используемых осцилляторов

Таким образом, оценка нелинейности ЗРПО в узком интервале значений, характеризует нелинейность измерительного устройства, состоящего из большого числа осцилляторов и, соответственно, его усилительные свойства.

Можно показать, что при отсутствии взаимодействия между осцилляторами точность измерительного устройства будет пропорциональна корню квадратному из числа осцилляторов. При сильном синфазном взаимодействии (коэффициент корреляции при этом положительный и стремится к единице) точность измерительного устройства будет пропорциональна числу используемых осцилляторов в первой степени. При этом увеличение числа осцилляторов приводит к увеличению крутизны кривой интегрального ЗРПО, что соответствует повышению чувствительности измерительного устройства.

Таким образом, чувствительность измерительного устройства, состоящего из ансамбля осцилляторов, пропорциональна произведению энтропийного коэффициента на эффективное число осцилляторов. Но если точность измерений при увеличении числа осцилляторов возрастает в любом случае, независимо от уровня взаимодействия осцилляторов, то чувствительность ансамбля осцилляторов зависит от уровня их взаимодействия. В режиме бифуркации при слабой связанности в колебательной системе чувствительность ОНИУ максимальна, а при увеличении связанности осцилляторов между собой чувствительность такого устройства убывает. С энергетических позиций снижение

чувствительности ансамбля осцилляторов при увеличении их взаимодействия можно объяснить тем, что повышение устойчивости колебательной системы к внешним воздействиям определяется значением эффективного числа осцилляторов, которое, в свою очередь, зависит от их общего количества и уровня взаимодействия между ними.

Наличие гистерезиса, обусловленного синхронизацией осцилляторов, приводит к тому, что дифференциальный закон распределения коррелированных случайных величин (амплитуд, частот) будет иметь два максимума, что расширит зону неопределенности измеряемой величины.

Для реальных ЗРПО нелинейность при различных интервалах неопределенности будет неодинаковой, а коэффициент нелинейности ОНИУ не будет зависеть от характера рассеяния параметров осцилляторов.

При изменении рабочего диапазона ОНИУ необходимо производить оценку интервала неопределенности ЗРПО с помощью квантиля (t):

$$K_n = K_s \cdot \frac{\sigma}{a} = K_s \cdot \frac{\sigma}{t \cdot \sigma} = \frac{K_s}{t}.$$

Например, для стандартной оценки интервала неопределенности при нормальном ЗРПО значение коэффициент нелинейности передаточной функции устройства будет соответствовать энтропийному коэффициенту:

$$K_n = K_s = 2,066.$$

Необходимо отметить, что в окрестностях истинного значения измеряемой величины (в середине интервала неопределенности ЗРПО) коэффициент относительной чувствительности системы будет достигать своего максимального значения. При увеличении числа осцилляторов в составе ОНИУ относительный интервал неопределенности будет уменьшаться, коэффициент нелинейности кривой интегрального ЗРПО, определяющий чувствительность ОНИУ будет возрастать.

Например, при треугольном виде ЗРПО получим:

$$K_s = 2,02, \sigma = \sqrt{\frac{2}{3}}a, \Delta x_s = K_s \cdot \sigma = \\ = 2,02 \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}a = 1,65 \cdot a, K_n = 1,65.$$

Для равномерного ЗРПО:

$$K_s = 1,73, \sigma = \frac{a}{\sqrt{3}},$$

$$\Delta x_s = K_s \cdot \sigma = K_n \cdot a = a, K_n = 1,0.$$

Для арксинусного ЗРПО:

$$K_s = 1,11, \sigma = \frac{a}{\sqrt{2}},$$

$$\Delta x_s = K_s \cdot \sigma = 1,11 \cdot \frac{a}{\sqrt{2}} = 0,785 \cdot a,$$

$$K_n = 0,785$$

Из приведенных рассуждений следует, что коэффициент нелинейности интегральной зависимости ЗРПО пропорционален энтропийному коэффициенту, характеризующему чувствительность ОНИУ. Таким образом, путем специального подбора осцилляторов по их характеристикам можно регулировать рабочий диапазон и чувствительность ОНИУ. Например, по сравнению с арксинусоидальным ЗРПО информативность нормального ЗРПО будет существенно выше

$$\left(\frac{2,066}{0,785} \approx 2,63 \right).$$

Недостатком такого упрощенного, статистического подхода к нахождению обобщенных характеристик ОНИУ является невозможность использования его для точного анализа процессов в сложных динамических системах, соответственно, для точного расчета и проектирования измерительных устройств на их основе. Применение вероятностной оценки обобщенных параметров колебательных систем пригодно лишь для весьма приближенного подхода к анализу и синтезу ОНИУ. Данный метод удобно использовать для качественного описания динамических процессов в таких системах.

К достоинствам предлагаемого метода вероятностной оценки параметров ОНИУ можно отнести его простоту и наглядность, возможность использования в инженерной практике для грубой оценки параметров ОНИУ, упрощенного анализа режимов их работы.

Необходимо отметить, что вероятностный подход к исследованию динамических процессов в сложных колебательных системах ОНИУ должен быть основан на использовании методов нелинейного оценивания. При этом коэффициенту корреляции будет являться функцией обобщенного коэффициента взаимодействия колебательной системы ОНИУ, он может быть положительным, отрицательным, равным нулю. Режим синхронизация колебаний отдельных осцилляторов между собой определяет интерференцион-

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ НЕЛИНЕЙНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ НЕЙРОНОПОДОБНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

ной характер суммарной колебательной мощности системы (вид кривой дифференциальной характеристики ЗРПО). Если в синхронном режиме кривая зависимости выходного сигнала ОНИУ будет иметь явные выступы и впадины, то в асинхронном режиме она будет более плавной. Это связано с переходом системы от детерминированной к стохастической (хаотический, случайный характер взаимодействий).

При возбуждении осцилляторов от отдельных автогенераторов колебательная система может оказаться разбитой на несколько синхронизированных областей или перейти в состояние динамического хаоса. Для анализа выходной информации таких ОНИУ, очевидно, потребуется использование методов распознавания образов.

Таким образом, принцип работы ОНИУ будет характеризоваться не только динамическими процессами однозначного соответствия следствия и причины, но и вероятностными законами. В нелинейных колебательных системах ОНИУ даже с малым числом степеней свободы могут возникать процессы, связанные с динамической необратимостью, появляться структурированные образования. Все это существенно усложняет анализ и синтез устройств такого типа, но для того чтобы адекватно отображать, измерять и кон-

тролировать физические процессы, протекающие в реальных объектах, потребуется создавать и соответствующей сложности средства измерения нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1997.
2. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания: Учеб. пособие для вузов.-М.: Издательство физико-математической литературы, 2002.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/ Под ред. Д.А. Поспелова – М.: Наука, 1986 – 312с.
4. 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.
5. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику: Учеб. руководство. – М.: Наука. Гл. ред. Физ.-мат. Лит., 1990 272с.
6. Рюэль Д. Случайность и хаос.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»,2001.
7. Шустер Г. Детерминированный хаос: Введение. М.: Мир, 1988.
8. Анищенко В.С. Сложные колебания в простых системах. М.: Наука, 1990.