

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Конашенковой Татьяны Дмитриевны

«Вейвлет методы анализа точности и обработки информации в стохастических системах при ударных воздействиях»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01

**«Системный анализ, управление и обработка информации
(информационно-вычислительное обеспечение)»**

Задача анализа точности и обработки информации в нестационарных стохастических системах является актуальной проблемой теории стохастического системного анализа. Диссертационная работа посвящена разработке методов и алгоритмов для аналитического моделирования существенно нестационарных ударных процессов на основе вейвлет разложений и вейвлет канонических разложений.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, приложения.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, приведены основная цель диссертации и основные положения, выносимые на защиту, выделена научная новизна результатов работы, дано краткое описание структуры и содержания диссертации.

В разделе 1 «Обзор работ и постановка задач» дан краткий обзор работ в области теории ударных стохастических систем, приведены основные модели и характеристики ударных воздействий, введены основные понятия (ударная стохастическая система (СтС), ударная случайная функция (УСФ) и т.п.) и, как результат исследования современного состояния теории ударных стохастических систем, выделены и описаны задачи диссертационного исследования.

В разделе 2 «Вейвлет методы и алгоритмы построения канонических разложений ударных случайных функций» приведены основные положения теории построения канонического разложения (КР) скалярных и векторных случайных функции и дано развитие этой теории в виде вейвлет канонических разложений (ВЛКР). В работе дано описание построения ВЛКР ударной СФ, заданной на конечном отрезке времени $[0, T]$, в виде линейной комбинации некоррелированных случайных величин (СВ) с коэффициентами в виде детерминированных координатных функций на основе ортонормированного базиса вейвлетов с конечными носителями, определенного для пространства $L^2[0, T]$.

В основе метода построения ВЛКР скалярной ударной СФ лежит теорема 2.1.5, в которой доказано:

1) дисперсии СВ определяются рекуррентными формулами через коэффициенты вейвлет разложения (ВЛР) ковариационной функции ударной СФ по двумерному ортонормированному базису пространства $L^2([0, T] \times [0, T])$, построенного в виде тензорного произведения двух соответствующих одномерных вейвлет базисов пространства $L^2[0, T]$ для случая, когда масштабирование по обоим переменным происходит одинаково;

2) координатные функции ВЛКР представимы в виде ВЛР по одномерному вейвлет базису пространства $L^2[0, T]$, коэффициенты этого ВЛР выражаются через коэффициенты ВЛР ковариационной функции ударной СФ по соответствующему двумерному ортонормированному базису пространства $L^2([0, T] \times [0, T])$.

На основе теоремы 2.1.5 построен алгоритм 2.1.5 построения ВЛКР скалярной ударной СФ.

В основе метода построения ВЛКР векторной ударной СФ лежит теорема 2.2.2, которая является обобщением теоремы 2.1.5 на векторный случай. На основе теоремы 2.2.2 построен алгоритм 2.2.2.

В разделе 3 «Вейвлет методы и алгоритмы анализа точности стохастических систем при ударных воздействиях» приведены основные положения теории точности линейной и линейной с параметрическими шумами ударной СтС (УдСтС) на основе применения метода Галёркина и вейвлет разложений.

Для анализа точности УдСтС, трудно реализуемых в натурных испытаниях, применяются математические модели. В качестве математической модели УдСтС в диссертации выбрано стохастическое дифференциальное уравнение (СДУ), описывающее ошибки функционирования системы как следствие воздействия на нее стохастических факторов и ударных возмущений. И тогда задача исследования точности УдСтС состоит в определении ее систематических ошибок и вероятностных характеристик случайных ошибок. Для нахождения систематических ошибок необходимо определить математическое ожидание стохастического процесса (СтП), описывающего состояние системы и удовлетворяющего СДУ. Вероятностные характеристики случайных ошибок определяются ковариационной матрицей этого СтП.

В диссертации возможность применения линейной или линейной с параметрическими шумами УдСтС в качестве математической модели прецизионной информационно-управляющей системы объясняется скоротечностью воздействия ударных СФ и наличием фильтрационных свойств измерительно-управляющих подсистем, в результате чего не успевают развиваться нелинейные стохастические эффекты. Для линейной УдСтС и линейной УдСтС с параметрическими шумами известны замкнутые системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных математического ожидания, ковариационной матрицы, матрицы ковариационных функций.

Применение приближенных численных итерационных методов решения задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных функций, содержащих ударную функцию (например, дельта-функцию или кусочно-непрерывную функцию), часто требует разработки специального приближенного метода, зависящего от вида ударной функции. В диссертации для решения таких систем уравнений предлагается применить метод вейвлетов Хаара-Галёркина (МВЛХГ), который является сочетанием известного метода вейвлетов Хаара и метода Галёркина. В основе метода лежит технология представления квадратично интегрируемых функций в виде сходящихся ВЛР. Решение каждого уравнения системы ищется в виде конечной линейной комбинации интегралов от вейвлетов Хаара. Известные функции, входящие в уравнения системы, аппроксимируются конечной линейной комбинацией вейвлетов Хаара. Основная трудность применения МВЛХГ, состоит в выписывании системы линейных алгебраических уравнений, связывающей неизвестные коэффициенты разложения решения уравнения по интегралам от вейвлетов Хаара, с известными коэффициентами ВЛР известных функций по базису Хаара.

Вейвлет метод нахождения математического ожидания стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением, определяется теоремой 3.1.1. На основе теоремы 3.1.1 получен алгоритм 3.1.1. решения задачи Коши для системы дифференциальных уравнений относительно математических ожиданий элементов стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением.

Вейвлет метод нахождения ковариационной матрицы стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением, определяется теоремой 3.1.2. На основе теоремы 3.1.2 получен алгоритм 3.1.2.

Вейвлет метод нахождения матрицы ковариационных функций стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением, определяется теоремой 3.1.3. На основе теоремы 3.1.3 получен алгоритм 3.1.3.

Вейвлет метод нахождения математического ожидания стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением с параметрическими шумами, определяется теоремой 3.2.1. На основе теоремы 3.2.1 получен алгоритм 3.2.1., полностью совпадающий с алгоритмом 3.1.1.

Вейвлет метод нахождения ковариационной матрицы стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением с параметрическими шумами, определяется теоремой 3.2.2. На основе теоремы 3.2.2 получен алгоритм 3.2.2.

Вейвлет метод нахождения матрицы ковариационных функций стохастического векторного процесса, описываемого линейным стохастическим дифференциальным уравнением с параметрическими шумами, определяется теоремой 3.2.3. На основе теоремы 3.2.3 получен алгоритм 3.2.3.

Эти вейвлет методы и алгоритмы являются универсальными относительно функций, описывающих ударные воздействия. Главным условием является их квадратичная интегрируемость этих функций в области определения. Разработанные методы позволяют заменить вычислительные процедуры с ударными функциями арифметическими действиями с постоянными коэффициентами вейвлет разложений этих функций по ортонормированному базису Хаара.

Для анализа точности многомерных нелинейных УдСтС, когда в общем случае невозможно выписать замкнутую систему обыкновенных дифференциальных уравнений для нахождения неизвестных математического ожидания и ковариационной матрицы, предлагается применить модифицированный моментно-семиинвариантный метод. В основе метода лежит теорема 3.3.1, определяющая способ составления и замыкания уравнений для неизвестных математического ожидания, ковариационной матрицы и определенного набора старших моментов. На основе теоремы 3.3.1 составлен алгоритм 3.3.1.

Для нелинейных ударных СФ, зависящих от круговой СВ (случайного угла) разработан метод эквивалентной статистической линеаризации. Получено уравнение для определения коэффициентов статистической линеаризации. Рассчитаны статистические коэффициенты для некоторых типовых нелинейностей, если круговая СВ имеет намотанное нормальное распределение (таблица 3.4.1).

Для практических применений на основе полученных теоретических результатов разработана методика анализа УдСтС.

Раздел 4 "Вейвлет методы и алгоритмы обработки информации в режиме реального времени в стохастических системах при ударных воздействиях" посвящен алгоритму построения с.к. оптимального линейного оператора для обработки информации с применением вейвлет технологий, а также вейвлет модификациям фильтра Калмана-Бьюси и линейного фильтра Пугачева обработки информации в режиме реального времени в линейных и линейных с параметрическими шумами УдСтС соответственно.

В работе рассматривается задача синтеза линейных оптимальных в среднем квадратическом (с.к.) систем. Для оценки выходного процесса в области S , построенного по результатам наблюдения входного процесса в области T , представленного в виде ВЛКР, построен с.к. оптимальный линейный оператор. В теореме 4.1.1 доказано, что вейвлет с.к. оптимальный оператор определяется набором формальных правил, описывающих реакцию системы на базисные вейвлет функции пространства $L^2(T)$, в виде функций, принадлежащих пространству $L^2(S)$.

Для входного и выходного сигналов, заданных в виде линейной зависимости от случайных параметров и аддитивной помехи, доказана теорема 4.2.1, определяющая структуру с.к. оптимального линейного оператора и получена с.к. оценка качества этого оператора. На основе теоремы 4.2.1. построен алгоритм 4.2.1.1 определения с.к. оптимального линейного оператора и вычисления с.к. оценки качества этого оператора. На основе теоремы 2.1.5, определяющей ВЛКР случайной помехи входного сигнала, и теоремы 4.2.1 построен алгоритм 4.2.1.2, определяющий с.к. оценку требуемого выходного сигнала.

Далее в работе получены вейвлет модификации фильтра Калмана-Бьюси (ФКБ) для линейной УдСтС и линейного фильтра Пугачева (ЛФП) для линейной УдСтС с параметрическими шумами для обработки информации в режиме реального времени. Эти

вейвлет модификации получены на основе применения метода вейвлетов Хаара–Галеркина. Вейвлет ФКБ и вейвлет ЛФП должны решать в режиме реального времени систему линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами в отличие от ФКБ и ЛФП, которые должны интегрировать систему обыкновенных дифференциальных уравнений, содержащих ударные функции (например, дельта-функцию или кусочно-непрерывные функции). Разработанные вейвлет алгоритмы позволяют заменить вычислительные процедуры с функциями сложной формы арифметическими действиями с постоянными коэффициентами вейвлет разложений известных функций по ортонормированному вейвлет базису. В основе вейвлет ФКБ лежат теорема 4.3.2 и алгоритм 4.3.2. Основой вейвлет ЛФП являются теорема 4.4.2 и алгоритм 4.4.2.

В Приложении дано описание тестовых примеров и инструментального программного обеспечения, разработанного автором для проведения вычислительных экспериментов.

В заключении приведены основные результаты, полученные автором.

К достоинствам работы Конашенковой Т.Д. можно отнести следующие результаты:

- 1) для скалярной и векторной ударных СФ разработаны алгоритмы построения вейвлет канонических разложений;
- 2) в случае линейной УдСтС и линейной УдСтС с параметрическими шумами при решении известных замкнутых систем обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных математического ожидания, ковариационной матрицы, матрицы ковариационных функций разработаны алгоритмы на основе ВЛР, позволяющие заменить решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений, содержащих ударные функции (например, дельта-функцию или кусочно-непрерывную функцию) решением системы линейных алгебраических уравнений с постоянными коэффициентами;
- 3) для существенно нелинейной УдСтС, когда невозможно выписать замкнутую систему обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных математического ожидания, ковариационной матрицы предлагается использовать модифицированный моментно-семиинвариантный метод, определяющий вероятностные моменты первого и второго порядков с учетом некоторого набора старших начальных моментов;
- 4) для типовых нелинейных функций, зависящих от круговой СВ, имеющей круговое намотанное нормальное распределение, аналитически рассчитаны коэффициенты статистической линеаризации;
- 5) разработан метод синтеза вейвлет с.к. оптимального линейного оператора и, как пример, метод синтеза вейвлет с.к. оптимального линейного оператора в случае линейной зависимости сигнала от параметров и аддитивной помехи;
- 6) разработана вейвлет модификация фильтра Калмана-Бьюси для обработки информации в режиме реального времени в линейных УдСтС и вейвлет модификация линейного фильтра Пугачева для обработки информации в режиме реального времени в линейных УдСтС с параметрическими шумами;
- 7) разработаны основные положения методики анализа точности УдСтС.

По работе можно сделать ряд замечаний:

1. В работе не освещаются перспективы использования предложенных методов ВЛР для решения задач управления и идентификации нестационарных систем широкого класса.
2. Не исследованы возможности повышения вычислительной эффективности предложенных алгоритмов.
3. В работе приводится слишком большое количество сокращений, что не всегда, на мой взгляд, является оправданным. Для некоторых из них в Автореферате не приведена расшифровка. Например: «ММСМ, МНА, МЭА» (стр.15). При этом в тексте Диссертации она приводится.

4. Встречаются отдельные стилистические неточности, например (Автореферат, стр. 15): «ММСМ дает более высокую точность (менее 2%) по сравнению с МНА и МЭА определения математического ожидания и ковариационной матрицы вектора состояния СтС, удовлетворяющих замкнутой системы обыкновенных дифференциальных уравнений для математического ожидания и ковариационной матрицы».

Здесь же: по-видимому, имеется в виду: «высокую точность (более 98%)».

Сделанные замечания не снижают высокой оценки выполненной Конашенковой Т.Д. работы, а носят характер пожеланий для будущих исследований.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

На основании изложенного считаю, что диссертация Конашенковой Татьяны Дмитриевны «Вейвлет методы анализа точности и обработки информации в стохастических системах при ударных воздействиях» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013, а ее автор, Конашенкова Т.Д., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (информационно-вычислительное обеспечение)".

Официальный оппонент

главный научный сотрудник
Института проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН
(ИПУ РАН),
доктор технических наук, профессор

Н.Н. Бахтадзе

14 мая 2021 г.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук (ИПУ РАН)

Адрес: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

Телефон: +7 495 334-89-10

Факс: +7 495 334-93-40, +7 499 234-64-26

E-mail: dan@ipu.ru

