ОТЗЫВ официального оппонента докторской диссертации В. Е Зотеева

И. В. Семушин

Кафедра «Информационные технологии»
Факультет математики и информационных технологий
Ульяновский государственный университет

Ульяновск—2009

Ульяновский государственный университет
ул. Л. Толстого 42
432970 Ульяновск Россия

08.12.2009

Информационные технологии
тел: +7 (8422) 32-1029
http://staff.ulsu.ru/sem~/
innokentiyvsem@gmail.com

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертационную работу Владимира Евгеньевича **ЗОТЕЕВА**

ЛИНЕЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ДИСКРЕТНЫЕ МОДЕЛИ В ФОРМЕ РАЗНОСТНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИССИПАТИВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

На оппонирование представлена диссертационная работа на 400 листах, включающая 126 рисунков и 52 таблицы. Работа разделена на Введение, шесть глав основной части, Заключение и Список используемых источников и литературы (206 наименований, из которых 68 — ссылки на труды автора). Приложение (58 страниц) содержит документы о внедрении / использовании результатов работы и листинги разработанного пакета прикладных программ.

Работа посвящена актуальной теме. Она находится в русле приоритетных, фундаментальных направлений совершенствования численных методов и реализуемых на их основе математических информационных технологий для успешного развития отечественного машиностроения. На любом этапе жизненного цикла сложной механической системы необходим надежный контроль ее технического состояния.

Математически, задачи контроля оказываются достаточно сложными. Возникнув в технике, они решаются средствами математики — теории обнаружения внезапных нарушений, теории обнаружения моментов нарушений, теории диагностики нарушений или теории идентификации моделей систем.

Практически все эти теории являются «model-based», т. е. основанными на моделях, чаще всего — параметрических моделях. Построение модели — определение ее структуры, а затем и ее параметрическое «наполнение» — служит отправной точкой упомянутых теорий. По сути дела, то, как построена модель, предопределяет или во многом определяет то, каким будет метод решения возникающих задач.

Какие же препятствия существуют на данный момент в области построения моделей процессов в механических системах?

Первое и основное препятствие — нелинейность моделей, далее — их многомерность, многосвязность и иногда — распределенность. Из этого набора автор данной диссертационной работы выбирает первое препятствие — нелинейность.

Таким образом, объект исследования данной работы — нелинейные диссипативные механические системы (ДМС), сводимые при их модельном (теоретическом) описании к системам скалярных дифференциальных уравнений следующих четырех видов относительно модельной координаты $\tilde{y}(t)$.

Четыре модели — четыре вида диссипативной силы:

$$m\tilde{y}''(t) + b\frac{\tilde{y}'(t)}{|\tilde{y}'(t)|} + c\tilde{y}(t) = P(t), \quad \text{—кулоново трение} \tag{1}$$

$$m\tilde{y}''(t) + b\tilde{y}'(t) + c\tilde{y}(t) = P(t), \quad \text{—линейно-вязкое трение} \tag{2}$$

$$m\tilde{y}''(t) + b\tilde{y}'(t)\left|\tilde{y}'(t)\right| + c\tilde{y}(t) = P(t), \quad \text{—турбулентное трение} \tag{3}$$

$$m\tilde{y}''(t) + b\,\mathrm{sign}\,[\tilde{y}'(t)] \cdot \frac{a^n}{\pi}\sqrt{1 - \frac{\tilde{y}^2(t)}{a^2}} + c\tilde{y}(t) = P(t), \tag{4}$$

—гистерезисное трение

Случай (2) — единственный, когда модель линейная.

Замечание:

В диссертации эти модели записаны на сс. 22–23 относительно не $\tilde{y}(t)$, а $y(t)$, хотя в дальнейшем (начиная со с. 145) под $\tilde{y}_k$ понимаются именно значения отклика модели (ЛПДМ — линейно-параметрической дискретной модели), формируемые по решениям $\tilde{y}(t)$ уравнений (1)–(4). При этом y_k обозначает измеренное значение отклика $y(t)$ реальной ДМС, а ε_k — отклонение y_k от $\tilde{y}_k$, так что $y_k = \tilde{y}_k + \varepsilon_k$.

Основная, базовая часть исследований автора

заключается в построении ЛПДМ для различных типов ДМС по ее отклику $\tilde{y}(t)$ на тестовые воздействия $P(t)$ нескольких типов и для различных областей съема отклика ДМС.

Так,

- если отклик снимается во временнóй области — по виброграмме (осциллограмме, сейсмограмме и т. п.), по кривой разгона (переходная характеристика ДМС), по кривой ползучести (неупругого деформируемого материала) или по огибающей колебаний ДМС, то ЛПДМ, естественно, строится в той же области, — основной материал глав 2, 3, 4 и 5,
- если же отклик снимается в частотной области — по экспериментально построенной амплитудно-частотной характеристике системы, то ЛПДМ строится в той же (частотной) области, — п. 5.3.

Независимо, в какой области фиксируются отклики и, соответственно, строится ЛПДМ, принцип $y_k = \tilde{y}_k + \varepsilon_k$ сохраняется, а именно: ε_k обозначает расхождение (невязку) между откликом y_k реальной системы (ДМС) и откликом $\tilde{y}_k$ ее модели (ЛПДМ).

Автор предлагает

строить (и делает это, применяя различные аппроксимации) для каждого конкретного приложения с точностью до некоторого вектора параметров λ. При этом формулируется задача подгонки параметров:

по экспериментальным замерам y_k и $\tilde{y}_k$ ($k = 1, \ldots, N$, N называется объемом выборки), полученным при одинаковом (для ДМС и ЛПДМ) плане эксперимента F и сведенным, соответственно, в векторы b и $F\lambda$, найти численным методом такие значения $\lambda^\star$ параметров, которые минимизируют взвешенный (с невырожденной матрицей W) квадрат евклидовой нормы $\|\eta\|_W^2 = \eta^T W \eta$ расхождения $\eta = b - F\lambda$.

Таким образом, автор

применяет методологию метода наименьших квадратов (МНК) к широкому кругу задач, возникающих при технической диагностике сложных нелинейных ДМС.

Почему эта методология не применялась в этой области ранее? Казалось бы, это должно было произойти раньше? Ответ на это любой может увидеть, если возьмется за такую работу, — здесь существуют большие препятствия!

Главные препятствия, которые преодолевает автор:

- Во-первых, неочевидно, как – (это очень непросто!) – построить необходимые ЛПДМ.
  Автор это делает весьма изобретательно. Даже там, где, казалось бы, это невозможно сделать в силу сложных нелинейных зависимостей, он делает это математически скрупулезно, обосновывая вынужденные аппроксимации. Все выкладки, необходимые для этого, он приводит в полном объеме, методично и строго, преследуя одну и ту же цель — разработать **научный подход** к построению линейно-параметрических дискретных моделей по тем модельным зависимостям — аналитическим решениям уравнений (1)–(3), которые изначально недискретные.

- Во-вторых, в базовом выражении $b = F\lambda + \eta$ для задачи метода обыкновенных наименьших квадратов (МОНК — Ordinary Least Squares), невязка η не должна быть функцией от модельного параметра λ, но здесь она каждый раз сложным образом зависит от λ: $\eta = P_\lambda \varepsilon$, где P_λ есть $N \times N$-матрица, зависящая от λ, а ε — вектор значений ε_k, т. е. весовая матрица $W = (P_\lambda P_\lambda^T)^{-1} = W(\lambda)$. Для преодоления этого препятствия автор разработал оригинальный и очень эффективный численный метод. Метод заключается в итеративном применении МОНК: на каждой n-й итерации для вычисления очередной оценки $\hat{\lambda}^{(n)}$ используются предыдущее МНК-решение $\hat{\lambda}^{(n-1)}$.

- В-третьих, матрица F плана эксперимента оказывается зависима от экспериментальных значений y_k, т. е. фактически от погрешностей ε_k. (Выражения для этих зависимостей систематизированы в табл. 3.1–3.4 на с. 132–134 диссертации и далее раскрываются в многочисленных примерах).

- Зависимость матрицы регрессоров F от результатов, т. е. от погрешностей эксперимента — тоже серьезное препятствие для применения МОНК. Строго, традиционный МОНК применять нельзя. Однако автор доказывает, что и в этом случае предложенный им итерационный метод МОНК сходится за небольшое число (единицы) итераций достаточно точно к неизвестному значению вектор-параметра λ, — без применения более сложного метода полных наименьших квадратов (Total Least Squares). Эти доказательства даны в форме теорем 3.1–3.2 и следствий 3.1–3.4 на с. 179–184, дополнены явным вычислением матриц, необходимых для реализации этого численного метода, — на с. 185–193, и результатами численно-аналитического исследования на с. 193–205, показывающими уменьшение ошибок смещения в оценках параметров λ модели на 2–3 порядка по сравнению с традиционной (неитерационной) процедурой МОНК, — табл. 3.11–3.21 и рис. 3.9–3.21.

Насколько детально автор обосновывает свои главные научные результаты и насколько эффективно он их излагает?

Автор диссертации применяет единую многошаговую схему получения и демонстрации своих результатов:

- Дает мотивировку — отмечает важность решения рассматриваемой задачи.
- Проводит предварительный анализ существующих методов решения и отмечает найденные недостатки.
- Строит ЛПДМ для рассматриваемой задачи — демонстрирует всю технику получения рекуррентных соотношений, связывающих последовательные отсчеты $\tilde{y}_k$ теоретической (модельной) зависимости $\tilde{y}(t)$.
- Заменяет в этих ЛПДМ модельные отсчеты $\tilde{y}_k$ экспериментальными отсчетами y_k, получаемыми от реальной ДМС, по формуле $y_k = \tilde{y}_k + \varepsilon_k$, тем самым вводя неизбежные расхождение ε_k между y_k и $\tilde{y}_k$ как вектор $\varepsilon = (\varepsilon_1 \mid \ldots \mid \varepsilon_N)^T$.

- Представляет построенную таким образом ЛПДМ в стандартной форме

$$
\begin{aligned}
b &= F\lambda + \eta && (5)\\
\eta &= P_\lambda \varepsilon, \quad \det P_\lambda \neq 0 && (6)
\end{aligned}
$$

алгебраической задачи решения переопределенной несовместной СЛАУ — системы линейных алгебраических уравнений $b = F\lambda$ в смысле критерия МОНК, взвешенного с $W = (P_\lambda P_\lambda^T)^{-1}$:

$$
\|\varepsilon\|^2 = \|\eta\|_W^2 = \eta^T W \eta = \|P_\lambda^{-1} b - P_\lambda^{-1} F\lambda\|^2 \to \min_\lambda \qquad (7)
$$

т. е. в форме задачи численного отыскания вектора $\lambda^\star$ как

$$
\hat{\lambda} = \arg\min_\lambda \|\varepsilon\|^2
$$

- Вводит статистическую интерпретацию модели (5)–(6), трактуя невязки ε как случайные векторы с нормальным распределением и двумя моментами

$$\mathbf{E}\left\{\varepsilon\right\} = \mathbf{0}, \qquad \mathbf{E}\left\{\varepsilon\varepsilon^T\right\} = I\sigma_\varepsilon^2.$$

- Конкретизирует вид и наполнение всех матриц, входящих в задачу (5), (6) и (7), для каждой из многочисленных подзадач, рассмотренных в рамках данного единого подхода.
- Конкретизирует все детали разработанного итерационного численного метода, решающего поэтапно последовательность задач МОНК.
- Реализует этот метод в виде компьютерного эксперимента, чтобы получить конкретные численные результаты — оценки $\hat{\lambda}$. Для этого автор планирует эксперимент в пакете прикладных программ, созданном в рамках данного диссертационного исследования в среде Microsoft Visual Basic 6.0.

- Подтверждает, что результаты применения его метода дают значительно более точные оценки по сравнению с другими методами. Для сравнения автор проводит (для тех же условий) вычислительный эксперимент по известным методам, заложенным в приложение Microsoft Excel системы MS Office XP.
- Вычисляет — на основании оценок $\hat{\lambda}$, полученных от своего оригинального метода, — оценки технических характеристик (собственной частоты, декремента затуханий и т. п.) исследуемой ДМС, пользуясь выведенными заранее аналитическими зависимостями этих характеристик от точных λ.
- Оценивает погрешности проведенных таким образом вычислений, сравнивая предлагаемый метод и известные методы по достигаемой точности.

- Завершает обоснование своего вклада в решение задачи выводами о преимуществах разработанного численного метода и тем подтверждает ценность данного научного подхода к построению и практическому использованию линейно-параметрических дискретных моделей в форме разностных уравнений в задачах идентификации диссипативных механических систем.

Такое детальное обоснование автор дает для каждого конкретного применения предлагаемого подхода, рассмотренного в работе. Но и в целом вся диссертация выстроена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным текстам:

- Глава 1 формулирует проблему повышения точности, быстродействия и расширения функциональных возможностей методов определения характеристик ДМС. Этим продиктована внутренняя логика представления всего материала исследования, его целей и задач в тексте диссертации.

- Глава 2 разрабатывает математическое описание диссипативных механических систем в форме линейно-параметрических дискретных моделей для ДМС различного типа и при различных типовых внешних воздействиях. Разработаны основополагающие принципы построения линейно-параметрических дискретных моделей и даны оценки точности строящихся ЛПДМ.
- Глава 3 разрабатывает и исследует свойства нового численного метода определения характеристик ДМС на основе введенных ЛПДМ. Математически строго обоснована сходимость предлагаемого метода.
- Глава 4 занимается исследованием — повышением точности и численной устойчивости предложенного численного метода. Учитываются погрешности разного происхождения: методические и инструментальные (от квантования измерений по времени, от округления при вычислениях, подробно — в табл. 4.1, с. 213–215).

Для улучшения численной обусловленности СЛАУ — нормальной системы уравнений $F^T W F \hat{\lambda} = F^T W b$ — разработан (на сс. 236–247, п. 4.3) структурный метод «прореживания» экспериментальных данных, доказана теорема 4.2 об оптимальном значении $l_0 = \left[\frac{T}{4\tau}\right]$ параметра прореживания l в формуле $\tau_l = l\tau$, гарантирующем наибольшее уменьшение числа обусловленности матрицы F, а значит и $F^T F$ (для случая модели (2)), где τ_l — период взятия отсчетов измерений после прореживания и τ — этот период до прореживания, T — период колебаний в ДМС.

- Глава 5 изучает вопросы построения линейно-параметрических дискретных моделей и применения в них разработанного численного метода идентификации для многих задач:
  - задача неупругого реологического деформирования материалов и элементов конструкций,
  - задача определения параметров передаточной функции систем автоматического управления,

- а также:
    - задача определения некоторых параметров САУ по амплитудно-частотной характеристике и
    - задача определения демпфирующих свойств ДМС с различными диссипативными силами и результаты практического применения разработанных методов в научно-технических проектах — при оценке технического состояния силовых элементов шасси самолета, в цифровом осциллографировании (упоминается использование ЛПДМ в серийных приборах) и при обнаружении некачественной сборки деталей прессованием (описана работа в пакете прикладных программ, созданном в среде Delphi).
- Глава 6 завершает основную часть работы представлением практических разработок автора — программного обеспечения, реализованного в среде MS Visual Basic 6.0, и пяти специализированных устройств определения динамических характеристик ДМС на основе ЛПДМ.

Проведенный анализ диссертационной работы В. Е. Зотеева, автореферата этой работы и имеющихся научных публикаций автора по теме диссертации позволяет мне с уверенностью констатировать следующее:

- **Актуальность избранной темы** несомненна. Она диктуется необходимостью надежного технического диагностирования сложных объектов машиностроения, в том числе, и в целях безопасности, с применением современных компьютерных средств.
- **Обоснованность и достоверность** положений, выносимых на защиту, обеспечены, а именно:
  - Теоретические основы и принципы построения ЛПДМ даны в полном объеме.
  - Линейно-параметрические дискретные модели построены для ДМС с различными показателями нелинейности диссипативных сил.

- далее:
  - Новые структурные соотношения во временно́й области между отсчетами колебаний в ДМС и динамическими характеристиками выведены математически строго.
  - Численный метод определения характеристик ДМС на основе ЛПДМ построен, проанализирован теоретически и испытан в вычислительных экспериментах многократно.
  - Структурные методы повышения численной устойчивости данного метода доказаны теоретически и проверены практически.
  - Численный метод определения параметров кривой ползучести на основе ЛПДМ, построен и испытан на реальных деформируемых материалах.
  - Линейно-параметрические дискретные модели для огибающей амплитуд колебаний в ДМС и численный метод определения диссипативных характеристик ДМС на их основе математически построены и экспериментально подтверждены.

- **Новизна** проведенных исследований и полученных результатов (на момент их опубликования) <u>имеется</u>. Оригинальными (впервые полученными в данной работе) являются следующие результаты:
  - новый научный подход к решению задачи определения характеристик ДМС, который заключается в многошаговой схеме, приведенной выше на слайдах 13–17 данного отзыва,
  - основы теории и техники построения ЛПДМ — новых рекуррентных соотношений, связывающих последовательные отсчеты $\tilde{y}_k$ теоретической (модельной) зависимости $\tilde{y}(t)$.
  - ЛПДМ для различных типов нелинейности диссипативной силы, новые как по структуре, так и по найденным связям их параметров с динамическими характеристиками исследуемой системы,
  - итерационный численный метод, решающий поэтапно последовательность задач МОНК, с доказательством сходимости метода (новое применение известного, классического метода обыкновенных наименьших квадратов),

- далее:
  - новые аналитические соотношения, выражающие оценку погрешности результатов определения динамических характеристик исследуемой системы через финальные МНК-оценки параметров ЛПДМ,
  - новые структурные методы повышения численной устойчивости МНК-оценок параметров ЛПДМ при плохой обусловленности задачи МНК,
  - новые ЛПДМ и численные алгоритмы определения параметров кривой ползучести при деформировании материалов и элементов конструкций,
  - новые ЛПДМ для огибающей колебаний ДМС с диссипативными силами общего вида — пропорциональными n-й степени скорости движения $(n = 0, 1, 2, \ldots)$,
  - новый численный алгоритм определения диссипативных характеристик систем типа (2) по ЛПДМ, построенной для амплитудно-частотной характеристики ДМС,
  - новые специализированные устройства для измерения различных диссипативных характеристик — декремента затухания и др.

- **Значимость результатов работы** для науки и практики продемонстрирована. Отмеченный выше новый научный подход применим для широкого класса ДМС, но его значение для науки не ограничивается этим классом. Подход принципиально применим для параметрической идентификации характеристик систем различной природы: электротехнических, биологических, химико-технологических, экономических и др. Методологическая база, созданная автором, предоставляет исследователям и специалистам-практикам, занимающимся определением динамических характеристик процессов, практический инструментарий и руководство по внедрению этих методов в новые аппаратные или программные средства.
- **Соответствие диссертации критериям**, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней (Постановление Правительства РФ от 30.01.2002 №74) имеется. Диссертация соответствует этим критериям в полной мере.

- Соблюдены необходимые **принципы соответствия**:
  – соответствие целей и задач,
  – соответствие автореферата и диссертации,
  – соответствие содержания диссертации и содержания опубликованных работ, а также
  – соответствие темы диссертации и научной специальности.

- **Строгость авторской аргументации** в тексте автореферата, в тексте публикаций и в самой диссертации, академический стиль изложения, отличное полиграфическое качество оформления, практическое отсутствие опечаток или грамматических ошибок свидетельствуют о высокой требовательности к себе и о высокой культуре автора как научного работника.

- **Автореферат диссертации соответствует ее тексту.** Несоответствие обнаружено в данных по публикациям автора по теме данного исследования, а именно:

Труды автора диссертации — В. Е. Зотеева	по списку литературы в диссертации	по списку трудов в автореферате	стр. 16 диссертации и стр. 11 автореферата
статьи (ВАК)	36	36	36
в трудах конф.	19	26	25
в сб. трудов	7	7	46
монографии	1	1	1
АС СССР	5	5	5
Всего	68	75	113

- **Основные результаты диссертационного исследования** опубликованы в печати. Отмеченное несоответствие числа публикаций автора в списках литературы в диссертации и автореферате не является существенным: научные положения диссертации полностью отражены в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК.

- **Сведения о практическом использовании результатов диссертации** приведены в достаточном объеме — пять актов о внедрении. Дальнейшее внедрение / использование результатов этой работы целесообразно проводить в организациях и учреждениях, занимающихся разработкой и исследованием сложных изделий отечественного машиностроения.

- В их числе:
  - Самарский государственный технический университет,
  - Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева,
  - Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
  - Ульяновский государственный технический университет,
  - Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана,
  - Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
  - Государственный технологический университет Московский институт стали и сплавов и др.
- В работе явно прослеживается **внутреннее единство** новых научных результатов, которое свидетельствует о том, что все результаты работы получены автором лично.

Вместе с отмеченными достоинствами этой солидной работы нельзя не отметить и **некоторые недостатки**, не являющиеся, впрочем, существенными для общей положительной оценки данного исследования.

По существу, заслуживает внимания лишь один недостаток, и он заключается в не вполне верной трактовке задачи (5), (6) и (7) метода наименьших квадратов. Как известно, этот метод как алгебраическая процедура отыскания $\hat{\lambda} = \arg\min_{\lambda} \|\varepsilon\|^2$ был предложен Лежандром в 1805 году и позднее подтвержден как статистическая процедура Гауссом в 1809 году (хотя рукопись Гаусса уже была доступна в 1806 году). Гаусс в работе 1809 года объявил, что он уже использовал МНК как алгебраическую процедуре с 1795 года, чем вызвал большое раздражение Лежандра[a].

[a] см. Stigler, S. M. (1977), An Attack on Gauss, Published by Legendre in 1820, *Historia Mathematica*, *4*, pp. 31–35.

Различие между нестатистической (чисто алгебраической) и статистической задачами иллюстрируется ниже на рис. 1 и рис. 2.

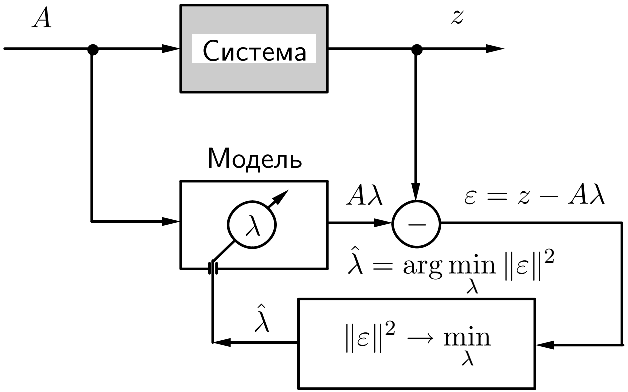

Figure: Рис. 1. Оптимальное моделирование неизвестной системы по экспериментальным условиям A и данным z. Критерий оптимальности — нестатистический. Подгонка модели под систему.

Решение $\hat\lambda = \arg\min\limits_{\lambda} \|\varepsilon\|^2 = (A^T A)^{-1} A^T z$. После его отыскания оно интерпретируется статистически. Для этого невязка ε трактуется как случайный гауссов вектор с характеристиками в контексте рис. 2.

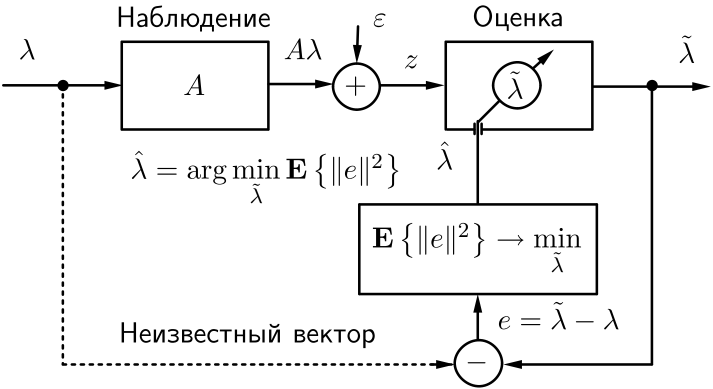

Figure: Рис. 2. Критерий оптимальности — статистический.

- Применительно к формулам (5), (6) и (7) на рис. 1 и рис. 2 следует считать, что $z = P_\lambda^{-1} b$ и $A = P_\lambda^{-1} F$, тогда $z = A\lambda + \varepsilon$.

- В диссертационной работе решается нестатистическая задача подгонки модели под реальную систему в контексте рис. 1.

- Однако это не означает, что автор тем самым превращает разностные уравнения ЛПДМ в стохастические разностные уравнения.
  Он ведь не получает (да и не обсуждает) вероятностное выборочное пространство, на котором были бы заданы реализации (ансамбль выборочных функций) решения этих уравнений и соответствующая вероятностная мера.

- Поэтому фразы о ЛПДМ в форме стохастических уравнений включены неоправданно.

- Дается простая статистическая интерпретация алгебраического решения переопределенной СЛАУ полного столбцового ранга. Слова о статистической обработке включены также неоправданно, поскольку обработка производится по одной реализации экспериментальных отсчетов процесса, а не по многим реализациям (выборкам) из генеральной совокупности (ансамбля) реализаций.

- Термины «выборка, объем выборки N» в работе имеют другой смысл: N означает число отсчетов, взятых от одной реализации процесса.

Статистическая интерпретация решения нормальных уравнений по рис. 2 в целом должна включать следующие пункты:

- Критерий $\min\limits_{\lambda}(z - A\lambda)^T(z - A\lambda)$ не является статистическим критерием. Решение, отвечающее ему, удовлетворяет нормальным уравнениям $(A^T A)\hat{\lambda} = A^T z$ и, когда $\operatorname{rank} A = n$, единственно: $\hat{\lambda} = (A^T A)^{-1} A^T z$.
- Статистическая интерпретация этого решения (рис. 2) имеет следующий смысл:
  - λ есть вектор (случайный или нет — это зависит от полноты интерпретации), который надо оценивать по наблюдениям $z = A\lambda + \varepsilon$,
  - A есть матрица наблюдений (в регрессионном анализе — матрица регрессоров, в теории планирования эксперимента — матрица плана эксперимента), которая показывает, какие элементы неизвестного вектора λ и в каких комбинациях включены в вектор наблюдаемых значений — в вектор z,

- (продолжение)
  - z есть значение измеряемого вектора $A\lambda$, искаженное присутствием аддитивной случайно помехи ε,
  - ε есть случайный вектор погрешностей измерений,
  - $\Lambda = A^T A$ есть информационная матрица решения $\hat{\lambda} = (A^T A)^{-1} A^T z$ при данных определениях, а его ковариационная матрица P равна Λ^{-1}.
- При условии гауссовых распределений оценка максимума правдоподобия вектора λ, как и оценка по среднеквадратическому критерию (рис. 2), определяется той же формулой $\hat{\lambda} = (A^T A)^{-1} A^T z$.
- При этом условии оценка максимума апостериорной вероятности параметра λ дается формулами фильтра Калмана: $\hat{\lambda} = \bar{\lambda} + K(z - A\bar{\lambda})$, $K = \bar{P} A^T (A \bar{P} A^T + R)^{-1}$, где $\bar{\lambda}$ – безусловное (априорное) среднее значение случайного λ, а $\bar{P}$ – его безусловная (априорная) ковариация, R — ковариация вектора ε.

- Последний из отмеченных пунктов указывает на то, что переопределенную СЛАУ, получаемую в этой работе, можно численно решать более эффективно, чем отмечается в работе (с разложением Холецкого или ортогональным разложением матрицы $\Lambda = A^T A$) на с. 211.

- А именно:
«расщепляя» большую СЛАУ на априорную и текущую порции уравнений, можно решать систему последовательно по алгоритму калмановской фильтрации, беря, правда, его не в том исходном виде, как показано выше, а используя современные факторизованные и совмещенные алгоритмы, обладающие высокой численной устойчивостью.

- Однако, это замечание можно отнести к пожеланиям для продолжения работ в этом направлении.

- Таким образом, диссертационная работа В. Е. Зотеева дает эффективное решение крупной научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение,

а именно —

- проблемы идентификации нелинейных диссипативных механических систем в процессе их эксплуатации или прочностных промышленных испытаний.

- Работа
  – содержит новые научные результаты,
  – имеет общетеоретическую значимость для науки и
  – представляет практическую ценность для специалистов в области конструирования, производства, испытаний и эксплуатации сложных изделий отечественного машиностроения.

- Работа полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Innokentiy Semushin

Digitally signed by Innokentiy Semushin
DN: CN = Innokentiy Semushin, C = RU, O = Ulyanovsk State University, OU = Department of Information Technology
Date: 2009.12.21 18:54:50 +03'00'

И. В. Семушин, д-р техн. наук
профессор

Подпись И. В. Семушина заверяю:
Секретарь Ученого Совета________________________О. А. Литвинко

Иннокентий Васильевич Семушин

http://staff.ulsu.ru/semoushin/

innokentiyvsem@gmail.com

В начало

Ульяновский государственный университет

СЕМУШИН
Иннокентий Васильевич
профессор, доктор технических наук
Математика и Информационные технологии

432000, Россия, г. Ульяновск
ул. Л. Толстого, 42 (для писем)
Набережная р. Свияга, кор. 1
тел.: (8422) 32-32-47, факс: (8422) 41-23-40
e-mail: innokentiyvsem@gmail.com

◂ В начало