

ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора

Цукерникова Ильи Евсеевича о диссертационной работе
Карпова Ивана Андреевича «Разработка метода экспериментального
определения коэффициента потерь колебательных систем на основе
дискретного ARMA-моделирования», представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7.
Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)

Актуальность темы исследования

Защита человека и оборудования от нежелательного воздействия шума и вибраций уже много лет неизменно числится среди наиболее актуальных виброакустических проблем. Ее решением вынуждены заниматься почти во всех отраслях промышленности, в том числе в строительстве, где от результатов ее решения во многом зависит экология повседневной жизни людей.

Одним из основных физических методов решения проблемы снижения шума и вибрации является увеличение потерь звуковой колебательной энергии путем ее поглощения, т.е. превращение в тепло, или путем ее перенаправления, т.е. с помощью изоляции и рассеяния, или другими способами. Таких способов и средств увеличения потерь уже создано довольно много, они продолжают совершенствоваться, и появляются новые по мере развития современной техники и увеличения числа и мощности традиционных источников шума и вибраций и появления новых. Соответственно, постоянно растет и необходимость в новых экспериментальных методах измерения и контроля потерь. Поэтому актуальность диссертационной работы Карпова И.А., в которой разработан новый метод экспериментального определения потерь, принципиально расширяющий динамический диапазон измерения коэффициента потерь, не вызывает сомнения.

Содержание диссертации

Диссертация Карпова И.А. содержит 109 страниц, 24 рисунка и 8 таблиц, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 101 наименования и трех приложений, написана четким и понятным языком. Автореферат диссертации содержит 32 страницы и в точности соответствует содержанию диссертации.

Во введении сформулирована цель диссертационной работы, состоящая в разработке нового метода экспериментального

определения коэффициента потерь, применимого к сложным инженерным колебательным системам, в частности, к сильно демпфированным системам. Показана актуальность работы, приведена ее общая характеристика: новизна, научная и практическая ценность, обоснованность и достоверность представленных в диссертации результатов, указаны положения, выносимые на защиту, отмечен личный вклад автора.

В главе 1 дано строгое определение коэффициента потерь как отношение энергии колебаний, поглощенной за один период, к средней по времени полной энергии системы. Указана связь максимальных значений коэффициента потерь с амплитудами вынужденных колебаний системы на резонансных частотах. Основная часть главы 1 посвящена историческому и аналитическому обзору существующих методов определения потерь. Основное внимание уделено методам экспериментального модального анализа (ЭМА), их основным допущениям и точности. В частности, отмечено, что, по общему мнению, точность существующих методов ЭМА «приемлема для анализа не слишком демпфированных систем» [Ewins D.J. Modal testing: theory and practice. Letchworth: Research Studies Press, 1986].

Глава 2 чисто теоретическая. Так как в предложенном в диссертации методе в качестве рабочей модели исследуемых колебательных систем используется дискретная модель типа ARMA, которая в акустике и механике практически нигде не используется, автору диссертации потребовалось для обоснования своего метода близко ознакомиться с теорией временных рядов и соответственными дискретными моделями, а также получить несколько новых теоретических результатов в этой области. Основные из них следующие: сформулирован критерий акустической эквивалентности непрерывных и дискретных моделей; установлена однозначная аналитическая связь между их параметрами, позволяющая строить дискретную модель по известной непрерывной модели и наоборот; получены формулы для теоретических значений порядка ARMA-моделей.

Глава 3 посвящена изложению предложенного в диссертации экспериментального метода определения потерь колебательных систем. Схема построения метода является традиционной для всех существующих подобных методов, а именно: вначале по данным измерения строится рабочая математическая модель исследуемой

колебательной системы, а затем коэффициенты потерь и собственные частоты рассчитываются по найденным модальным параметрам.

В известных методах в качестве рабочей модели традиционно используется непрерывная модальная модель (разложение по собственным частотам и формам колебаний), параметры которой *нелинейно* входят в зависимости измеряемых величин – смещения, ускорения, давления и т.п. Необходимость при построении модели решать нелинейные уравнения, а также решать другую трудную проблему, так называемую проблему порядка модели или, иначе, проблему неопределенности выбора числа учитываемых мод в модели, приводит к необходимости введения упрощающих допущений и, соответственно, снижению точности и пределов применимости известных методов ЭМА.

В методе, предложенном в настоящей диссертации, в качестве рабочей модели используется дискретная ARMA-модель – авторегрессионная модель скользящего среднего (с аббревиатурой от английского наименования Autoregressive Moving Average model). Параметры модели связаны линейно с измеряемыми величинами и поэтому с большой точностью могут быть вычислены известными методами алгебры. Кроме того, в диссертации предложен энергетический критерий (energy criterion (EC)) адекватности ARMA-моделей, который решает проблему порядка модели. Эти два новых результата диссертации фактически составляют существо и новизну предложенного метода, обеспечивая, в сравнении с известными методами, кардинальное повышение точности и расширение области применения предложенного метода. В главе 3 описан также выбор порядка ARMA-модели, изложены алгоритмы определения ее параметров по измеренным данным и вычисления искомых модальных параметров – собственных частот недемпфированной системы и коэффициентов потерь системы с демпфированием.

В главе 4 исследованы ключевые свойства предложенного метода определения потерь, касающиеся в основном его области применения. Так как сравнение результатов диссертации с результатами, полученными известными приближенными методами, не может служить надежным обоснованием применимости предложенного метода, оценка его области применения была получена в работе с помощью численных экспериментов на специально сконструированных искусственных образцах с заданными модальными параметрами. Образцы представляют собой механические системы с конечным

числом сосредоточенных материальных параметров. Они имеют заданные автором собственные частоты и коэффициенты потерь и возбуждаются белым шумом. Случайные сигналы возбуждения и отклика этих систем затем используются в качестве «данных измерения». К ним применялся метод диссертации, и полученные результаты сравнивались с заданными значениями. Применимость метода считалась установленной, если их разность не превышала 5%.

Хотя эти эксперименты проводились с искусственно сконструированными системами и сигналами, и судить о реальной точности предложенного метода по этим результатам, очевидно, нельзя, тем не менее, о принципиальной его применимости к системам с теми или иными модальными параметрами, по моему мнению, вполне допустимо. Используя такую методику проведения экспериментов, в диссертации были получены и подтверждены следующие уникальные свойства предложенного метода:

- метод применим к линейным колебательным системам произвольной материальной природы с любыми допустимыми значениями коэффициента потерь, т.е. в диапазоне от 0 до 2, при любом их возбуждении, силовом или кинематическом, и при измерении любого физического отклика – смещения, скорости, ускорения или давления;

- метод применим к системам с большой плотностью собственных частот с сильно накладывающимися друг на друга резонансными откликами;

- метод слабо зависит от ширины рабочего диапазона частот и поэтому допускает применение частотной декомпозиции.

Эти свойства крайне полезны в натурных измерениях. Насколько мне известно, такими свойствами не обладает ни один из известных методов.

В главе 5 описаны два лабораторных эксперимента и один натурный эксперимент, подтвердившие работоспособность предложенного метода. Получено хорошее совпадение с результатами измерения известными методами в области их применения.

В диссертации есть также три приложения, одно из которых, приложение Б, заслуживает особого внимания. В нем показано, что часто применяемая в литературе формальная замена производных конечными разностями при переходе от непрерывных моделей к дискретным допустима только для акустических задач, в которых можно использовать малые интервалы дискретизации и небольшие

значения числа отсчетов. В остальных случаях она может кардинально искажать физический смысл получаемых решений.

Из изложенного следует, что диссертационная работа Карпова И.А. обладает новизной, ее результаты представляют собой научную и практическую ценность, они достоверны и обоснованы теоретически и экспериментально, а также апробированы в 12 международных и всероссийских конференциях, в лабораторных и натурном экспериментах.

Содержание диссертации опубликовано в трех статьях, индексируемых в базе данных WoS, и в 12 публикациях, индексируемых в РИНЦ.

Аннотация полностью отражает содержание диссертационной работы.

По диссертации имеются следующие **замечания**.

1. Целью диссертационной работы является разработка метода измерения коэффициента потерь, применимого к сильно демпфированным системам. Но при очень сильном демпфировании собственные частоты системы становятся мнимыми, и привычное понятие колебательной моды теряет смысл. Однако в работе об этом не сказано ничего. Осталось неясным, будет ли работать в этом случае предложенный метод. Если будет, то, что он будет измерять?

2. Одним из основных результатов работы является предложенный в ней ЕС критерий адекватности ARMA-моделей. Насколько мне известно, из теории идентификации систем, существует целый ряд аналогичных критериев адекватности. Чем ЕС критерий отличается от известных критериев? Почему они не устраивают автора?

3. При использовании аббревиатуры от английского наименования термина, как, в энергетическом ЕС критерии, следует приводить английский термин перед или сразу после аббревиатуры при первом ее применении.

4. В тексте диссертации и аннотации имеются опечатки, неточности и нечеткие формулировки. Они не требуют специальных пояснений, поэтому были оформлены отдельным списком и переданы автору диссертации.

Перечисленные замечания, однако, носят лишь рекомендательный характер и не умаляют отмеченных выше достоинств, научной и практической значимости выполненной работы.

Диссертация Карпова И.А., таким образом, представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, выполненную на должном уровне и соответствующую специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (технические науки). На основании изложенного можно сделать вывод о том, что диссертационная работа «Разработка метода экспериментального определения коэффициента потерь колебательных систем на основе дискретного ARMA-моделирования» удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Карпов Иван Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (технические науки).

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории
«Защита зданий от вибраций и структурного шума»
Федерального государственного бюджетного учреждения
«Научно-исследовательский институт строительной физики
Российской академии архитектуры и строительных наук»
(НИИСФ РААСН)

Цукерников Илья Евсеевич

« 01 » декабря 2025 г.

Контактные данные:

Тел.: +7 (910) 485-58-32

Электронная почта: 3342488@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.06 Акустика

Адрес места работы:

127238, г. Москва Локомотивный проезд, 21

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН)

Тел.: +7 (499) 488 64 92

Электронная почта: niisf@niisf.ru

Я, Цукерников Илья Евсеевич, даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Карпова И.А. и их дальнейшую обработку.

Подпись Цукерникова Ильи Евсеевича ЗАВЕРЯЮ:



ЗАВ.ОТДЕЛОМ КАДРОВ
НИИСФ РААСН
РАСЧИНСКАЯ И.С.