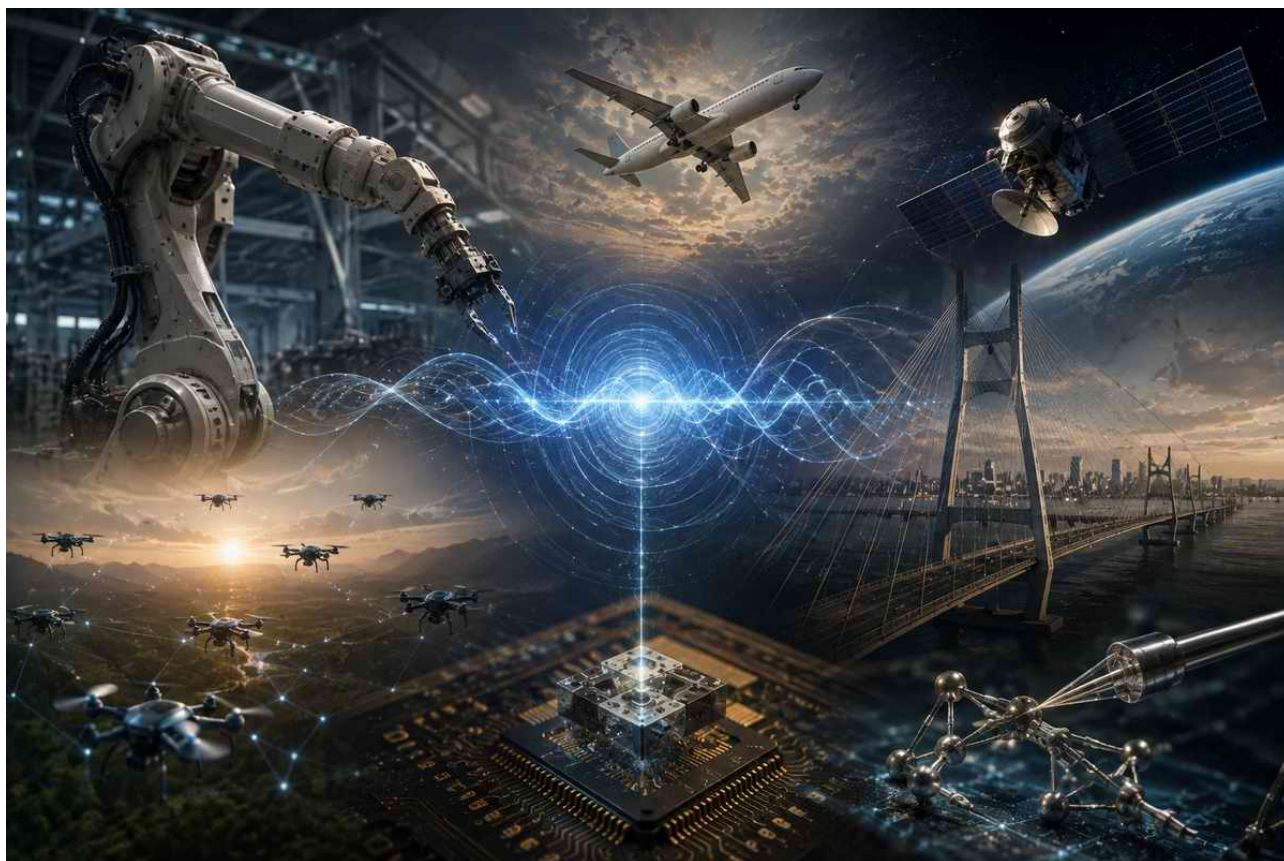


## Математика против вибраций: теория NI-систем выходит из лабораторий в робототехнику, авиацию и нанотехнологии



Дата публикации: 10.08.2026

Когда роботизированная рука резко останавливается, она не всегда замирает мгновенно. Конструкция может слегка колебаться, изгибаться и вибрировать. Похожая проблема возникает у крыла самолета, спутниковой антенны, высотного сооружения и даже у микроскопического механизма размером в несколько микрометров. Чем легче, длиннее и точнее становится техника, тем серьезнее инженерам приходится относиться к таким колебаниям.

Бороться с ними помогает теория управления — область математики и инженерии, которая определяет, как машина должна реагировать на изменения своего состояния. Одно из сравнительно молодых направлений этой науки известно как теория систем с отрицательной мнимой частью, или Negative Imaginary Systems, сокращенно NI.

Название звучит необычно и даже несколько загадочно. Однако никакого отношения к воображению или «отрицательному зрению» оно не имеет. Термин

происходит из математического анализа динамических систем и описывает определенный класс их частотных характеристик.

За последние два десятилетия NI-системы прошли путь от узкой математической концепции до инструмента, который все чаще рассматривают применительно к реальным инженерным устройствам. Исследователи проследили эту эволюцию, проанализировав более 400 научных работ, опубликованных с 2004 по 2024 год.

Получилась своеобразная карта развития целой научной дисциплины. Она показывает не только рост количества публикаций, но и изменение характера исследований. Если первоначально ученых интересовали главным образом математические доказательства устойчивости, то теперь все больше работ посвящено робототехнике, аэрокосмическим системам, распределенному управлению, нанотехнологиям и методам, основанным на данных.

Понять практическую ценность NI-теории проще всего на примере роботизированного манипулятора. Чем длиннее и легче его звенья, тем сильнее они напоминают не абсолютно жесткую конструкцию, а очень слабую пружину. При быстром движении такая система может начать колебаться.

Если манипулятор используется на автомобильном заводе, небольшая вибрация иногда означает потерю точности. Если аналогичный механизм выполняет сверхточные операции с микроэлектроникой или медицинским оборудованием, даже едва заметное отклонение может оказаться существенным.

Инженерная задача поэтому состоит не просто в том, чтобы приказать роботу переместиться из точки А в точку Б. Необходимо сделать это быстро, точно и так, чтобы система после движения не начала раскачиваться.

Еще сложнее ситуация становится при использовании обратной связи. Датчики постоянно измеряют положение конструкции, а контроллер на основании этих данных корректирует движение. Неправильно настроенная система управления способна не подавить вибрацию, а, наоборот, усилить ее.

Именно проблема устойчивости находится в центре NI-теории. Она дает инженерам математические условия, позволяющие определить, когда определенные классы колебательных систем и их контроллеров смогут устойчиво работать вместе.

Это особенно важно для гибких конструкций. Современная техника постоянно стремится уменьшить массу: легкий самолет расходует меньше топлива, легкий космический аппарат дешевле выводить на орбиту, а облегченный робот способен двигаться быстрее. Но снижение массы нередко

увеличивает гибкость конструкции и ее склонность к колебаниям.

В аэрокосмической отрасли проблема проявляется особенно наглядно. Крылья самолетов, панели спутников, антенны и другие крупные элементы не являются идеально жесткими. Они способны деформироваться и вибрировать, поэтому система управления должна учитывать собственную динамику конструкции.

Похожие задачи существуют в строительной инженерии. Высотные здания, мосты и другие крупные сооружения испытывают воздействие ветра, движения транспорта и других внешних сил. Методы активного управления могут использоваться для уменьшения нежелательных колебаний и повышения устойчивости конструкции.

Но, пожалуй, наиболее необычная область применения возникает на противоположном масштабе — в нанотехнологиях. Там движения настолько малы, что вибрации, практически незаметные человеку, становятся серьезной погрешностью.

Например, системы сверхточного позиционирования должны перемещать элементы на чрезвычайно малые расстояния и практически мгновенно останавливаться в заданной точке. Даже небольшие остаточные колебания ограничивают скорость и точность такого оборудования.

Поэтому одна и та же математическая идея оказывается потенциально полезной для объектов совершенно разных размеров. Возможные применения можно перечислить в одну строку: роботизированные манипуляторы, беспилотные системы, самолеты, спутники, гибкие конструкции, высокоточные позиционеры, микро- и наномеханические устройства.

Анализ двух десятилетий исследований выявил еще одну интересную тенденцию. На ранних этапах направление формировалось относительно небольшой группой ученых и научных организаций. Это типичная ситуация для молодой математической теории, когда несколько исследовательских школ создают ее основные определения, теоремы и методы.

Теперь география исследований расширяется, а сами задачи становятся разнообразнее. Особенный интерес вызывают нелинейные системы. Реальные машины редко ведут себя настолько идеально, чтобы их динамику можно было полностью описать простыми линейными моделями.

Расширение NI-теории на нелинейные процессы потенциально позволяет приблизить математические методы к поведению настоящих роботов и механизмов. Это один из признаков перехода дисциплины от фундаментальной

теории к более широкому инженерному применению.

Еще одно перспективное направление связано с управлением на основе данных. Классическая теория управления обычно начинается с математической модели объекта. Инженер описывает систему уравнениями, а затем рассчитывает контроллер, который должен обеспечить нужное поведение.

Однако современные машины становятся настолько сложными, что построить их абсолютно точную модель трудно. Поэтому исследователи все чаще пытаются извлекать необходимые характеристики непосредственно из данных, полученных датчиками во время работы системы.

Сочетание NI-теории с такими методами может позволить создавать контроллеры для объектов, математическая модель которых известна лишь частично. Это особенно интересно для сложной робототехники и сетей взаимодействующих машин.

Последний пример связан с еще одной быстро развивающейся областью — многоагентными системами. Если несколько роботов должны двигаться совместно, необходимо управлять уже не одной машиной, а целой динамической сетью.

Дроны могут лететь группой, автономные роботы — совместно перемещать груз, а распределенные датчики и исполнительные механизмы — одновременно управлять большой конструкцией. Колебания и ошибки одного элемента при этом способны распространяться на остальные.

Именно поэтому исследования распределенных архитектур становятся заметной частью развития NI-систем. Теория, первоначально созданная для анализа определенных классов динамических объектов, постепенно адаптируется к системам, состоящим из множества взаимосвязанных компонентов.

При этом обзор выявил важное ограничение. Математическая база направления развивается быстрее, чем практическое внедрение. Теоретических публикаций пока значительно больше, чем экспериментальных демонстраций и полноценных промышленных применений.

Это означает, что NI-системы еще нельзя назвать повсеместной технологией, уже управляющей большинством роботов или самолетов. Между математически красивой теорией и надежным промышленным контроллером всегда существует большой этап испытаний, сертификации и проверки в реальных условиях.

Но именно этот разрыв одновременно представляет главную возможность

для дальнейших исследований. Основные математические инструменты уже созданы, теория устойчивости становится более зрелой, а круг потенциальных применений расширяется.

История NI-систем показывает характерный путь фундаментальной науки. Математическая концепция, которая двадцать лет назад была интересна сравнительно небольшому кругу специалистов, постепенно находит задачи, для которых ее свойства оказываются практически полезными.

И чем больше техника становится легкой, гибкой, миниатюрной и взаимосвязанной, тем актуальнее становится проблема управления вибрациями. Роботы должны двигаться быстрее и точнее, спутники — сохранять устойчивость после маневров, а наноустройства — позиционироваться с практически невероятной точностью.

Поэтому будущее NI-теории, вероятно, будет определяться уже не только новыми математическими доказательствами. Главным испытанием станет способность превратить эти формулы в работающие системы управления и показать, насколько хорошо они справляются с вибрациями и нестабильностью за пределами лабораторных моделей.

**Ссылка:** «Системы с отрицательной мнимой величиной в теории управления: библиометрический подход» DOI: [10.1080/00207721.2025.2610401](https://doi.org/10.1080/00207721.2025.2610401).