Теория скрытых колебаний — путь к стабильным техническим, экономическим и социальным системам

06.03.2026

Ученый из Санкт-Петербурга член-корреспондент РАН Николай Владимирович Кузнецов стал лауреатом Государственной премии РФ в области науки и технологий 2024 г. за разработку теории скрытых колебаний. В интервью для портала «Научная Россия» ученый рассказывает о сути теории, ее прикладном значении для развития и проектирования новых технических систем, создания стабильных экономических и социальных механизмов.



Николай Владимирович Кузнецов — доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии РФ в области науки и технологий член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой прикладной кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета

— Что такое теория скрытых колебаний? Какие данные она учитывает и почему важна для науки?

— Основная задача теории скрытых колебаний — исследования динамики различных объектов. Если говорить о ее прикладном значении, то это прежде всего технические объекты, однако теория также включает связанные фундаментальные математические задачи.

Теория скрытых колебаний — это следующий этап развития теории колебаний академика А.А.

Андронова и его блестящих идей по соединению чисто математических концепций, предложенных еще Анри Пуанкаре, с радиофизическими экспериментами. Математика представляет собой универсальный язык, который оказывается чрезвычайно удобным и плодотворным при решении задач в любой сфере. А теория скрытых колебаний — прикладное применение этого математического языка, например для развития систем управления, анализа и прогнозирования динамики сложных объектов, к которым относятся в том числе различные инженерные и энергетические системы. На основе такого анализа становятся возможными синтез и проектирование новых технических решений.

— Что это за скрытые колебания, которые вы исследуете? Почему и чем они скрыты?

— Простой и наглядный пример из медицины и биологии — дыхательная система человека. Когда младенец находится в утробе матери, его дыхательная система пребывает в стационарном состоянии. Кислород поступает через пуповину, дыхательная система стабильна, в ней отсутствуют колебания. После рождения дыхательная система переходит из этого стационарного состояния в колебательный режим. Это явление самовозбуждения колебаний, которое описывал академик А.А. Андронов. Подобная ситуация часто встречается в физических экспериментах с техническими системами: например, при включении света возникают колебания электричества.

Представим другую ситуацию: человек едва не утонул и его необходимо вернуть к жизни с помощью реанимации. Его дыхательная система находится в стационарном состоянии, но оно устойчиво, и легкого воздействия уже недостаточно, чтобы запустить колебательную динамику. Чтобы вывести начальные условия динамической системы из зоны устойчивого равновесия и перевести в область притяжения нужного колебательного режима, способного восстановить дыхание, требуется существенное воздействие — электрический разряд или искусственное дыхание. Предполагается, что такой режим в системе еще возможен. При этом важно правильно подобрать начальные условия. Такие колебания называются скрытыми: их область притяжения вне зоны «видимости», говоря математическим языком, отделена от естественных стационарных состояний, которые мы наблюдаем.

Дыхательная система — это пример полезных скрытых колебаний. Однако в технике, как правило, такие колебания нежелательны. Идеалом считается система, подобная неваляшке, которая при любых отклонениях и возмущениях возвращается в стабильное положение. Например, при посадке самолета боковой порыв ветра может вывести систему из стационарного режима полета по заданной траектории. Чтобы обеспечить безопасную посадку в такой ситуации, система управления должна быстро вернуть самолет к устойчивому состоянию, не допуская возникновения нежелательных колебаний.



— Говоря о самолетах: эффект флаттера, с которым в свое время справился академик М.В. Келдыш, — это тоже проявление скрытых колебаний?

— В таких системах могут наблюдаться как самовозбуждающиеся, так и скрытые колебания. Задача, которую М.В. Келдыш решил перед Великой Отечественной войной вместе с группой из ЦАГИ, касалась подавления самовозбуждения колебаний в системах управления самолетов на высоких скоростях. Мощность двигателей росла, а материалы и конструкции не успевали за этим развитием. В результате на определенных предельных скоростях элероны или крыло начинали колебаться. Если амплитуда колебаний нарастала, это приводило к разрушению конструкции.

Процесс самовозбуждения колебаний можно наблюдать в физическом эксперименте при постепенном увеличении скорости. Но в натурных экспериментах очень сложно предсказать резкие отклонения, например сильные боковые порывы ветра, которые могут вызвать колебания. Перебрать все возможные возмущения невозможно.

Поэтому для детального исследования динамики проводят комплексные испытания, например в аэродинамической трубе, на разных скоростях и при различных нагрузках. Это сложная задача, и для гарантированного исключения нежелательных колебаний недостаточно только расчетов и экспериментов, необходимо развивать теорию. Теория скрытых колебаний как раз и направлена на разработку аналитических методов и их синтез, чтобы создать аналитико-численные методы, позволяющие выявлять и прогнозировать такие явления еще на этапе проектирования систем.

М.В. Келдыш со своей научной группой в какой-то степени решил эту задачу. Стоит вспомнить, что Германия перед Второй мировой войной потеряла больше сотни опытных образцов самолетов — это была катастрофа для отрасли. Советскому Союзу благодаря работам М.В.

Келдыша этой проблемы удалось избежать. Однако в тех же системах, помимо наблюдаемых самовозбуждающихся колебаний, могут возникать и скрытые. Сам М.В. Келдыш в своих работах аккуратно отмечал, что во многом опирался на интуицию, — нужной математической теории тогда не существовало. Он был потрясающе образованным человеком, ученым с огромной научной культурой и всегда указывал, где переходит от строгого математического языка к инженерной интуиции. Одну из таких его работ мы продолжили и смогли повысить точность оценок возникновения не только самовозбуждающихся, но и скрытых опасных колебаний.

— Насколько сложно прогнозировать и определять процессы, которые приводят к возникновению скрытых колебаний? Тем более что для каждой технической системы они, видимо, уникальны…

— С одной стороны, математический язык действительно позволяет формулировать общие положения и создавать универсальные инструменты. Благодаря этой универсальности они и находят широкое практическое применение и привлекают внимание. С другой стороны, у любой теории есть некоторые ограничения, в том числе и с прикладной точки зрения, и возникают задачи, которые невозможно решить только теоретически.

Однако развитие теории чрезвычайно важно для формирования инженерной интуиции и описания, понимания и прогнозирования различных эффектов, которые еще не наблюдаемы, но могут возникать в сложных системах. Как работал тот же М.В. Келдыш? Он сначала рассматривал очень простую модель флаттера, с ее помощью оценивал, что может происходить, понимал и описывал суть явления. А затем, опираясь на инженерную интуицию, рассчитывал поведение реальной системы и способы, которые помогут избежать опасных эффектов.



— В этой работе сегодня способен помочь искусственный интеллект? Ему достаточно данных для анализа?

— С моей точки зрения, искусственный интеллект — просто очередной этап развития информатики и информационных технологий. Их активное развитие началось в 1980-е гг., когда в школах начали преподавать информатику и прошла первая Всесоюзная олимпиада. Высшее образование в этой области, тесно связанное с математикой, массово сформировалось в 1990-е гг. Основные успехи развития цифровых технологий — это теоретическая информатика и алгоритмы: математический язык компьютерной науки. Эта важная связь отразилась в специальности «Прикладная математика и информатика».

Теперь вычислительные мощности значительно возросли, объемы данных увеличились, а алгоритмы стали сложнее. ИИ стал новым этапом в развитии информатики и сегодня активно применяется в науке и технике в том числе как инструмент, с помощью которого можно получать новые знания. В теории скрытых колебаний активно объединяются классические численные подходы моделирования и ИИ. Это позволяет выявлять условия, в которых могут возникать скрытые колебания или прогнозировать их появление в зависимости от допустимых параметров системы.

— Математические методы используются не только в технике и инженерии, но и в общественных науках. Теория скрытых колебаний как-то применяется, например, в экономике?

— Конечно. С теорией скрытых колебаний связано отдельное экономическое направление. Это задача прогнозирования. Например, мы стремимся к стабильности курса национальной валюты, рубля, что позволило бы увереннее прогнозировать экономическую деятельность. Однако курс динамически зависит от множества факторов: валютной выручки, налогов и других показателей. Изменяя эти величины, мы наблюдаем, как меняется курс рубля, и должны прогнозировать поведение системы в рамках существующих механизмов.

Идеальная ситуация — когда эти механизмы работают устойчиво, как законы физики, а не требуют постоянной ручной корректировки, что плохо сказывается на долгосрочном экономическом прогнозировании. Здесь также возникает проблема нежелательных колебаний экономических показателей, особенно в условиях шоковых отклонений, например при крахе компаний, панике на рынках, скачках цен на энергоносители, природных и социальных катаклизмах.

— Таких как, скажем, пандемия COVID-19?

— Да, пандемия — это замечательный пример шокового фактора: тогда произошло существенное отклонение от начальных данных из-за ограничительных мер, в том числе спад производства, сокращение работающего населения и увеличение затрат на медицину. Такие шоковые ситуации могут приводить к тому, что экономическая система сбивается со стабильной траектории и притягивается к нежелательному колебательному режиму. Причем часто это не самовозбуждающиеся колебания, которые легко обнаружить и предотвратить, а скрытые и труднопрогнозируемые.

Вообще колебательные процессы характерны для социальных систем. Знаменитая модель Лотки — Вольтерры «хищник — жертва» показывает, что численность травоядных и хищных видов в определенных замкнутых пространствах, например в северной тундре, циклически меняется. Подобные динамические явления широко распространены в социальных и экономических науках, и теория скрытых колебаний находит здесь масштабное применение.

Возвращаясь к медицинской теме: аналогичные принципы работают в сердечно-сосудистой и дыхательной системах. У здорового человека кратковременная задержка дыхания или физическое воздействие могут изменить сердечный ритм, но организм возвращается к устойчивому рабочему колебательному режиму. Задача заключается в том, чтобы при любых отклонениях система возвращалась к этому здоровому ритму, не переходя в иные устойчивые, но опасные колебательные состояния — например, к резкому учащению сердцебиения. Поэтому здесь также открывается широкое поле для практического применения теории.

— Что в теории скрытых колебаний ученые пока не смогли понять? Над какими задачами работаете сейчас?

— Когда возникают новые классы динамических объектов, различные научные направления стремятся выявить общие механизмы и условия, при которых могут возникать такие нежелательные колебания. В определенных моделях, будь то экономические системы или технические задачи, существуют свои особенности. Например, в системах управления часто присутствует единственное состояние равновесия, к которому система должна стремиться из любых начальных условий.

Соответственно, в различных классах моделей возможно определять общие закономерности возникновения скрытых колебаний и описывать их, чтобы предлагать эффективные методы предотвращения или подавления. В этом состоит основная прикладная задача.

С другой стороны, параллельно с развитием прикладных направлений, где изучаются скрытые колебания, развивается и общая теория. Она создает единый фундамент и общий язык для всех этих методов.

— Ваши работы широко цитируют за рубежом. На каком уровне относительно других стран сегодня находится российская математическая наука?

— В первую очередь необходимо понимать, что наука не может быть национальной. Стоит вспомнить слова А.П. Чехова: «Национальной науки нет, как нет национальных таблиц умножения». Наука — это международный процесс накопления и развития знаний. Но, конечно, существуют национальные особенности развития научных направлений.

Если говорить о математике, то Россия по праву гордится своей математической школой. Становление математики в стране неразрывно связано с эпохой Петра I и созданием Российской академии наук: в этом году исполняется 325 лет указу Петра о развитии математического и навигацкого образования. Эти направления изначально были связаны, потому что требовалось решать практические задачи, в том числе ходить на кораблях, а навигация требовала существенных математических знаний.

С созданием академии наук в Россию были приглашены первые академики, среди которых был и Леонард Эйлер. Этот знаменитый математик и механик стал адъюнктом по физиологии и занимался в том числе исследованиями движения жидкости по трубкам, фактически моделируя кровоток в сосудах. Эти исследования основывались на математических методах, которые развивали и другие ученые. За три столетия российская математическая школа достигла выдающихся результатов и получила мировое признание. Если говорить о нашем направлении — математической теории управления, то фундаментальный вклад внесли такие ученые, как И.А. Вышнеградский, А.М. Ляпунов, А.А. Андронов и многие другие всемирно известные математики.

Математические школы формировались не только в Петербурге, где была основана Российская

академия наук, но и в других городах России. Эти мощные научные коллективы занимают достойное место в международном научном сообществе. Важно отметить, что кроме кадрового потенциала и талантливой молодежи ключевую роль играют государственные программы поддержки. Эффективное развитие науки и прорывы требуют крупных ресурсных вложений.

— Сегодня математикам хватает этой поддержки?

— Уровень государственной поддержки и внимания, как мне кажется, никогда нельзя считать избыточным — чем их больше, тем лучше. Однако уже существующие программы поддержки и развития математики в нужные моменты оказывали значительное влияние. История циклична, и периодически возникающие проблемы вновь и вновь ставят перед государством сложные вызовы. Государство преодолевало их не раз: в годы революции и Гражданской войны, когда Россию покидали множество образованных людей, в период перестройки и после распада Советского Союза, когда происходила сложная трансформация науки. Сегодня мы сталкиваемся с новыми вызовами как в политическом аспекте, так и в сфере международного сотрудничества. Опыт преодоления таких трудностей у нас есть, и государство в целом стремится оказывать необходимую поддержку.

На общем собрании членов РАН в декабре 2025 г. президент академии наук Г.Я. Красников говорил о программе технологического лидерства России, в которой академия наук принимает активное участие, и о соответствующем финансировании. Вице-президент РАН С.Л. Чернышев на заседании Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления рассказывал о шестой подпрограмме, направленной на применение прикладных наук для развития технологий, необходимых, в частности, для военно-промышленного комплекса.

Внимание государства действительно есть, и мы его чувствуем и через Российский научный фонд, выделяющий гранты, и через активно развивающиеся программы. Однако работы в этом направлении всегда много. Она должна учитывать текущую, постоянно меняющуюся ситуацию — как международную, так и внутреннюю. Серьезно меняются и образовательные программы в связи с переходом от Болонской системы к национальной системе высшего образования. Чтобы сохранить научные школы, коллективы и организации, необходима непрерывная поддержка со стороны государства. Это позволит продолжать эффективную работу и достигать результатов того уровня, который требуется для ответа на вызовы, стоящие сегодня перед страной.

Источник: scientificrussia.ru

Фото: Ольга Мерзлякова / Научная Россия