

А.А.ЛАРИН, канд.техн.наук; НТУ «ХПИ»

ВКЛАД Е.Г.ГОЛОСКОКОВА В РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ

У статті викладена коротка історія розвитку теорії нестационарних коливань механічних систем і проаналізований внесок у неї відомого вченого з ХПІ – доктора технічних наук, професора Є.Г.Голоскокова. Присвячується 80-річчю з дня народження.

The history of the Theory of Non- stationary Vibrations of mechanical systems is submitted in the paper. The contribution of professor Goloskokov E.G., well-known scientist from KhPI, to the solution of this problem is analysed. The paper is devoted to his 80th anniversary.

Евгений Григорьевич Голоскоков известен как крупный ученый, внесший заметный вклад в развитие теории нестационарных колебаний, механических систем. Его кандидатская [1] и докторская [2] диссертации посвящены проблемам нестационарных колебаний.

Долгое время теория механических колебаний развивалась в рамках общей механики и не имела самостоятельного прикладного значения. Пожалуй, всерьез проблемы динамики стали беспокоить инженеров только в начале XX столетия. На первых этапах развития прикладной теории механических колебаний исследования зачастую ограничивались определением спектра собственных частот [3]. Однако с развитием техники возникли задачи о вынужденных колебаниях, в том числе и нелинейных систем. Среди таких задач особое место занимают нестационарные колебания.

С ростом скорости вращения энергетических машин - двигателей внутреннего сгорания, паровых и газовых турбин и одновременным снижением их веса, эксплуатационные обороты во многих случаях стали превышать резонансные или критические значения колебаний машин в целом или их отдельных деталей, таких как рабочие лопатки, диски, роторы, коленчатые валы и др. Стремление облегчить конструкцию привело развитие турбомашин к применению в них так называемых "гибких" роторов, для которых первые критические скорости оказываются ниже рабочих оборотов. В этом случае во время пуска (разгон) или остановки (выбег) машина проходит резонанс. Амплитуды колебаний при этом меньше, чем на установившемся резонансном режиме, так как они не успевают развиться, поэтому обычный расчет вынужденных резонансных колебаний даст завышенное значение амплитуд. В связи с этим актуальной задачей для таких систем стало изучение переходного процесса, т.е. нестационарных колебаний. Учет особенностей этих колебаний в динамических расчетах способствует более обоснованному выбору запасов прочности и служит дополнительным резервом снижения веса конструкции.

С необходимостью исследования нестационарных колебаний мы встречаемся также в задачах о прохождении через резонанс центрифуг, насосов, различных гироскопических систем, при исследовании систем регулирования,

изучении колебаний в системах с переменными параметрами. Нестационарные колебательные процессы возникают также в машинах и механизмах при аэродинамических воздействиях среды, движущейся с переменной скоростью, при действии ударных, пульсирующих или подвижных нагрузок, например, в задачах, связанных с колебаниями мостов и подъемных кранов. Нестационарные процессы имеют большое значение и для решения практических задач электротехники, радиотехники и акустики.

Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы, принципиальных отличий от уравнений установившихся движений не имеют. Однако сами решения этих уравнений в корне отличаются от расчета вынужденных установившихся колебаний и требуют большого объема вычислений. В связи с этим до появления вычислительной техники разрабатывались различные приемы решения данных уравнений. Наибольший практический интерес среди всех переходных процессов представляет прохождение через резонанс, которое зачастую определяет работоспособность конструкции. Первыми исследованиями, посвященными переходу через резонанс линейной системы с одной степенью свободы, были работы начала 1930-х гг. – Ф.М.Льюиса [4] и Т.Пешля [5]. В них частота возмущающей силы принималась изменяющейся по линейному закону. Наряду с прямым интегрированием, для получения решения уже тогда применялись сходящиеся или асимптотические ряды [4].

Именно прохождение через резонанс и выделил Евгений Григорьевич из всего спектра проблем нестационарных колебаний в своей кандидатской диссертации, защита которой состоялась в 1958 г. в Ученом совете ХПИ. Научным руководителем был профессор А.П.Филиппов, в то время заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин», член-корреспондент АН УССР.

В противовес прямому интегрированию и разложению решения в ряды А.П.Филиппов и Е.Г.Голоскоков предложили замену обобщенных координат комплексными переменными, сведя задачу к вычислению интегралов вероятностей от комплексного аргумента. Для них существуют таблицы [6], применение которых для вычисления интегралов от быстро колеблющихся функций значительно сокращает трудоемкость вычислений по сравнению с численным интегрированием или пользованием рядами. В результате получается зависимость амплитуды колебаний, происходящих с переменной частотой, от времени, т.е. огибающая кривая колебательного процесса. Это обеспечивает эффективность метода решения данной задачи и для систем большой размерности. Именно этот прием позволил Е.Г.Голоскокову разработать эффективную методику определения максимальной амплитуды колебаний в задаче о прохождении через резонанс линейной системы с одной степенью свободы под действием возмущающей силы, линейно изменяющейся по частоте [1, с. 161]. Решения, выраженные через интеграл вероятностей от комплексного аргумента, позволяют рассматривать прохождение через резонанс и для высших собственных частот.

Амплитуда резонансных колебаний сильно зависит от демпфирования и решения, полученные без учета трения, особенно при медленном проходе через резонанс, очень плохо согласуются с экспериментальными данными. Од-

нако учет сопротивления даже в виде вязкого трения приводит к серьезным вычислительным трудностям. В работе [7] А.М.Кац вывел приближенную формулу, определяющую значение частоты при которой достигается максимум амплитуды нестационарных колебаний при переходе через резонанс с учетом вязкого трения. Однако во многих случаях трение в механической системе не отвечает вязкой модели, а описывается петлей гистерезиса. В кандидатской работе Евгения Григорьевича приведен способ решения дифференциального уравнения при учете сопротивления по гипотезе Е.С.Сорокина [8] и при действии произвольной внешней силы. Предлагаемый подход значительно проще, чем способ, применяемый самим Сорокиным, и облегчает использование его гипотезы в случае любых линейных систем.

В своей работе Е.Г.Голоскоков теоретически исследовал наиболее простую модель турбинной лопатки в виде стержня постоянного сечения и пластины с сосредоточенным грузом [1, с. 84-100]. Поведение этих систем аналогично поведению систем с одной степенью свободы, если выполняется предположение о слабом влиянии нерезонирующих форм колебаний. Используя соответствующую замену он исследовал влияние упругости заделки, инерции вращения, центробежных силы инерции и др. Кроме линейного возрастания частоты возмущения, рассматривалось также и уменьшение ее. Получены также решения для случая пропорциональности внешней силы квадрату частоты, что соответствует возбуждению силами инерции.

Рассмотрены также колебания дисков паровых турбин под действием сил переменной частоты [1, с. 112-143]. Теоретические заключения подтверждаются соответствующими экспериментами. В результате Е.Г.Голоскоков создал основу для достаточно точного учета особенностей перехода через резонанс в машинах [1, с. 145-160].

Но, получив ученую степень кандидата технических наук, Евгений Григорьевич не остановился на достигнутом, продолжая активно работать над проблемами нестационарных колебаний и расширяя круг рассматриваемых проблем. Все работы он проводит совместно с А.П.Филипповым, который в 1967 году был избран действительным членом АН УССР. В 1965 г. вышла в свет фундаментальная монография Анатолия Петровича «Колебания механических систем» [9], в которой главы, посвященные колебаниям вращающихся валов и нестационарным колебаниям, в частности прохождению через резонанс, подготовлены Е.Г.Голоскоковым [9, предисловие автора, с. 4]. То же было и в следующей монографии А.П.Филиппова «Колебания деформируемых систем» [10].

Объектами исследования становятся диски, прямоугольные плиты, гибкие роторы, соосные роторы и другие части турбомашин. Е.Г.Голоскоковым исследовались также вопросы нестационарных колебательных процессов, возникающих в машинах и механизмах, в авиационной технике, при аэродинамических нагрузках от движущейся с переменной скоростью среды, при действии ударных и импульсных нагрузок и при случайных возмущениях. Результаты исследований были опубликованы в монографии «Нестационарные колебания механических систем» [11] подготовленной совместно с А.П.Филипповым и изданной в Киеве в 1966 году. Так же называлась и тема

докторской диссертации Евгения Григорьевича, научным консультантом которой был Анатолий Петрович [2]. Успешная защита ее состоялась в 1968 году в Ученом совете ХПИ. В 1971 году в Берлине была издана еще одна книга, посвященная нестационарным колебаниям [12].

В указанных работах Е.Г.Голоскоков охватил уже весь спектр проблем нестационарных колебаний. В частности, первые четыре главы его докторской диссертации посвящены изучению нестационарного перехода через резонанс линейных систем не только дискретных, но и континуальных. При этом особое внимание уделено исчерпывающему исследованию классической задачи о нестационарных колебаниях линейной системы с одной степенью свободы в предположении, что источник энергии обладает неограниченным запасом мощности, а частота возмущающей силы изменяется по заранее предписанному закону, в частности по линейному или экспоненциальному. На основе использования табулированного интеграла вероятностей от комплексного аргумента разработана сравнительно простая методика расчета амплитуд колебаний на любой стадии переходного процесса без использования информации о предыстории, то есть без построения кривой предшествующего колебательно-го процесса и без ограничений на величину скорости изменения частоты возмущения (при ее линейном законе изменения).

Полученное решение задачи для системы с одной степенью свободы, а также информация и выводы, следующие из этого решения, послужили основой для анализа нестационарных колебательных процессов в системах со многими степенями свободы, движение которых описывается линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, поскольку они сводятся к сумме решений соответствующих дифференциальных уравнений второго порядка. Это обстоятельство позволило разработать единую методику решения задач о нестационарных колебаниях более сложных систем.

Еще больше внимания в работе уделено переходным процессам в нелинейных системах, изучение которых гораздо сложнее. Для исследования нестационарных процессов в них широко используются асимптотические методы, развитые трудами основоположников нелинейной механики Н.М.Крылова и Н.Н.Боголюбова [13, 14]. Уравнение, описывающее поведение нелинейной системы содержит малый параметр и строится таким образом, что при его равенстве нулю, становится линейным. Для получения его решения киевские ученые предложили метод осреднения или метод медленно меняющихся амплитуд. Ученик Н.М.Крылова и Н.Н.Боголюбова Ю.А.Митропольский рассматривает [15] медленный проход через резонанс с помощью методов нелинейной механики. В результате им дано дальнейшее развитие и применение метода усреднения для изучения нестационарных режимов в сложных нелинейных системах, а также дано математическое обоснование асимптотического метода. Применение этого метода позволяет, в частности, исследовать такие специфические явления, присущие только нелинейным системам, как автоколебания и субгармонические колебания. Однако даже для систем сравнительно небольшой размерности построение асимптотических решений уже затруднено. В связи с этим в работах Ю.А.Митропольского [15] и В.А.Грובהва

[16] применяется одночастотный метод, который позволяет построить асимптотические приближения для нелинейной системы со многими степенями свободы на основе простой расчетной схемы, представляющей некоторую эквивалентную систему с одной степенью свободы. Евгений Григорьевич также применил асимптотические разложения по степеням малого параметра для исследования нестационарных режимов.

Одной из важнейших задач прохода через резонанс является преодоление валом так называемых критических оборотов, но, несмотря на ее важность, долгое время вопрос об изгибных колебаниях вращающихся при переменных оборотах валов и их напряженном состоянии долго оставался не изученным. Критической угловой скоростью называется угловая скорость вращения вала, при которой упругие восстанавливающие силы и моменты, возникающие при его прогибе, уравновешиваются силами инерции и их моментами при обращении вала вокруг линии подшипников. Теория вращения гибкого вала с одним диском при постоянном числе оборотов дает следующее представление о характере движения: вал выгибается в плоскости неуровненности и в таком изогнутом состоянии вращается вокруг линии опор. При этом вектор прогиба на скорости ниже критической направлен в ту же сторону, что и вектор дисбаланса, а на скорости выше критической – в противоположную сторону. При наличии трения вектор дисбаланса всегда составляет некоторый угол с вектором прогиба. На критической же скорости эти векторы образуют прямой угол. Это соответствует сдвигу фазы на $\pi/2$ при резонансе обычной системы с одной степенью свободы.

Первая попытка решения вопроса поперечных колебаний вращающегося вала с одним диском при переходе через критическую скорость была предпринята П.Л.Капицей в 1939 г. [17]. Но в этой работе автор, принимая угловое ускорение слишком малым, приходит к решению, которое, в сущности, отражает вынужденные установившиеся колебания. Ф.М.Диментберг [18, с. 47-65] рассматривает систему с одной степенью свободы, то есть случай прохождения через критическую скорость вала с одним диском, а затем сравнивает его с валом, имеющим распределенную массу. Оказывается, что такой вал вблизи любой из критических скоростей ведет себя как вал с одной степенью свободы. В конце 1950-х гг. появились работы В.А.Грובהа [16] и О.Н.Романива [19], посвященные нестационарным колебаниям валов турбин вблизи критических оборотов в условиях разгона и выбега.

Однако, несмотря на определенные успехи, совершенно не был освещен вопрос об изгибных колебаниях при переходе через критическую скорость вращения вала на упругих анизотропных опорах и вала, неравножесткого в двух плоскостях изгиба. В системе с упругими опорами разной жесткости в вертикальном и горизонтальном направлениях имеется уже две критические скорости, а прогибы вала на оси, вращающейся вместе с ним системы координат, содержат вторую гармонику колебаний. Напряжения в вале содержат медленно меняющуюся составляющую, которая неоднократно переходит через 0, достигая наибольшего значения в момент времени, несколько смещенный относительно момента достижения критической скорости вращения.

В работе Евгения Григорьевича установлено, что, в отличие от вращения

круглого вала с критической скоростью, когда силы внешнего трения, независимо от их величины, ограничивают деформации вала, в задачах об устойчивости вала двойкой жесткости это наблюдается не всегда. Им также подробно изучено влияние упругих опор на критические скорости вала с одним диском при учете гироскопического эффекта, обусловленного податливостью опор, и показано, что при определенных условиях поведение системы является таким же, как и в хорошо изученном случае жестких опор, но с несимметрично расположенным диском [20].

Известный теоретический и практический интерес представляет задача о вращении ротора на нелинейных упругих опорах, впервые решенная для вала постоянного поперечного сечения в работе [21]. Решение этой задачи позволяет объяснить поведение ряда упругих систем, а также построить теорию и методы нелинейного демпфирования колебаний элементов машин с помощью применения упруго-нелинейных звеньев. В докторской диссертации Е.Г.Голоскокова задача о критических режимах обобщается на случай валов переменного поперечного сечения и решается методом последовательных приближений на базе интегральных уравнений, предложенных в монографии И.А.Биргера [22, с. 122-129]. Метод позволяет учитывать гироскопический эффект распределенных и сосредоточенных масс и допускает реализацию алгоритма последовательных приближений на ЭЦВМ для вычисления не только первой, но и высших критических скоростей вращения. При этом метод не имеет ограничений на количество нелинейных упругих опор и имеет хорошую сходимость, что иллюстрируется примером [2, с. 382-385].

В 1960-е гг. появились газотурбинные установки, у которых соосные роторы связаны между собой через опоры. При этом на каждый вал действуют возмущения, имеющие разные частоты, что приводит к возникновению режимов прямой и обратной прецессии. В таких системах происходит перекачка энергии от одного ротора к другому, вследствие чего могут возникнуть субгармонические (дробные) резонансы и автоколебательные режимы. Е.Г.Голоскоков рассмотрел одну из принципиальных схем соосных роторов и подтвердил своим исследованием возможность существования устойчивых автоколебательных режимов [2, с. 401-402]. Он также проанализировал влияние некоторых параметров на амплитуды автоколебаний.

Работами В.О.Кононенко положено начало новому разделу в исследовании нестационарных колебаний механических систем – систем с источниками энергии ограниченной мощности. В его монографии [23] излагаются основополагающие исследования, определяющие основные особенности поведения систем с ограниченным возбуждением в стационарном и нестационарном режимах. Автором были выяснены энергетические соотношения, вносимые учетом ограниченной мощности двигателя, и показан их геометрический смысл при стационарном режиме. При этом на базе метода усреднения рассмотрены параметрические колебания, автоколебания, резонанс n -го рода, одночастотные резонансные колебания в системе с n степенями свободы, взаимодействующей с источником энергии и другие задачи. На основе работы В.О.Кононенко Евгений Григорьевич рассмотрел колебания системы с одной

степенью свободы, взаимодействующей с источником энергии. В диссертации также приводятся решения двух задач об изгибно-крутильных колебаниях автономной системы двигатель – ротор и колебаниях системы двигатель – вал двойкой жесткости. Ввиду сложности дифференциальных уравнений движения рассматриваемых систем, решения получены при помощи электро моделирующей машины МПТ-9 [2, с. 452, 496].

Подробно рассмотрена задача, начало которой положено еще в середине XIX века – движение груза по балке, в том числе с переменной скоростью. Применение ЭВМ позволило, наконец, получить исчерпывающее решение.

Е.Г.Голоскоков продолжает активно работать над проблемами нестационарных колебаний и после присвоения ему ученой степени доктора технических наук. Этим вопросам были посвящены и работы его аспирантов [24, с. 12], а результаты исследований отражены в очередной монографии Е.Г.Голоскокова и А.П.Филиппова «Нестационарные колебания деформируемых систем» [25]. Дальнейшие научные работы, проводимые под руководством Е.Г.Голоскокова, связаны с исследованием динамики сложных машин и конструкций. Теоретическая база для данных исследований создана фундаментальными трудами академика Филиппова и профессора Голоскокова. Они одними из первых использовали колоссальные возможности, предоставляемые для проведения динамических расчетов вычислительными машинами. К внедрению численных методов расчета колебаний на ЭВМ были привлечены ученики Евгения Григорьевича, которыми были получены важные практические результаты. Разработаны математические модели упругих многомассовых систем, учитывающие взаимодействия металлоконструкций и приводных механизмов с системами управления, что успешно было использовано в прикладных задачах проектирования кранов различных типов. На этой основе решен ряд важных проблем динамики и исследованы переходные режимы приводных механизмов. Созданные методики и программное обеспечение для ЭВМ использованы для расчетов долговечности крановых конструкций с учетом стохастичности процессов рабочего цикла, в исследовании колебаний передней стойки шасси космического корабля многоразового использования «Буран», роботов-манипуляторов, предназначенных для обслуживания складских автоматизированных комплексов и во многих других задачах. По данному направлению опубликовано более пятидесяти научных работ и защищено несколько кандидатских диссертаций [24, с. 13-14].

Работы Е.Г.Голоскокова отличаются актуальностью, а результаты их внедрены на ведущих предприятиях страны. В 1984 году Евгений Григорьевич в числе коллектива авторов цикла работ по обеспечению прочности энергетических машин и внедрение их в практику турбиностроения удостоен Государственной премии Украинской ССР в области науки и техники, а в 1986 году награжден орденом «Знак Почета». Результаты научной работы Е.Г.Голоскокова доложены на ряде всесоюзных и международных съездов, конференций и совещаний и отражены почти в 200 трудах, в том числе в трех монографиях. Список трудов опубликован в библиографическом указателе, выпущенном к 80-летию Евгения Григорьевича [24].

Список литературы: 1. *Голоскоков Е.Г.* Прохождение через резонанс линейных систем с одной и многими степенями свободы (стержни, пластины) дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1958. – 202 с. 2. *Голоскоков Е.Г.* Нестационарные колебания механических систем дис. ... докт. техн. наук. – Харьков, 1968. – 564 с. 3. *Ларин А.А.* Становление теории колебаний механических систем: исторический обзор // Дослідження з історії техніки Зб. наукових праць. – К.: НТУУ «КПІ», 2006. – Вип. 8. – С. 41-50. 4. *Lewis F.M.* Vibration During Acceleration Through a Critical Speed. – Transaction of the ASME. – 1932. – 54. – 23. – P. 253-263. 5. *Pöschl T.* Das Anlaufen eines einfachen Schwinger. - Ing. Arch. – 1933. – 4. – P. 98-102. 6. *Фаддеева В.Н., Терентьев Н.М.* Таблицы значений интеграла вероятностей от комплексного аргумента. – М.: ГИТТЛ, 1954. – 268 с. 7. *Кац А.М.* Вынужденные колебания при прохождении через резонанс. – Инж. сб. – 1947. – Т. III, вып. 2. – М.: Изд-во АН СССР. – С. 100-125. 8. *Сорокин Е.С.* Динамический расчет несущих конструкций зданий. – М.: Госстройиздат, 1956. – 340 с. 9. *Филиппов А.П.* Колебания механических систем. – К.: Наукова думка, 1965. – 716 с. 10. *Филиппов А.П.* Колебания деформируемых систем. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с. 11. *Голоскоков Е.Г., Филиппов А.П.* Нестационарные колебания механических систем. – К.: Наукова думка, 1966. – 334 с. 12. *Goloskokov E.G., Filippov A.P.* Einstationäre Schwingungen mechanischer Systeme. – Berlin, Akademie-Verlag, 1971. 13. *Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н.* Введение в нелинейную механику. – К.: Изд. АН УССР, 1937. – 321 с. 14. *Ларин А.А., Аврамов К.В.* Асимптотические методы в нелинейной динамике и история их развития в Украине с 1930-го года // Механіка та машинобудування. – Вип. 1. – 2006. – С. 297-304. 15. *Митропольский Ю.А.* Нестационарные процессы в нелинейных колебательных системах. – К.: Изд-во АН УССР, 1955. – 283 с. 16. *Грбов В.А.* Асимптотические методы расчета изгибных колебаний валов турбомашин. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 166 с. 17. *Катица П.Л.* Устойчивость и переход через критические обороты быстро вращающихся роторов при наличии трения // Журнал технической физики, 1939. – Т. IX, вып. 2. – С. 125-147. 18. *Диментберг Ф.М.* Изгибные колебания вращающихся валов. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1959. – 248 с. 19. *Романив О.Н.* Поперечные колебания вала двойкой жесткости Львов, 1957. – 83 с. 20. *Николаи Е.Л.* Теория гироскопов. – М.: Гостехиздат, 1948. – 171 с. 21. *Григорьев Н.В.* Нелинейные колебания машин и сооружений. – М.-Л.: МАШГИЗ, 1961. – 256 с. 22. *Биргер И.А.* Некоторые математические методы решения инженерных задач. – М.: Оборонгиз, 1956. – 151 с. 23. *Кононенко В.О.* Колебательные системы с ограниченным возбуждением. – М.: Наука, 1964. – 254 с. 24. Евгений Григорьевич Голоскоков (к 80-летию со дня рождения) Биобиблиографический указатель / Сост. А.А.Ларин, С.А.Горелова. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 44 с. 25. *Голоскоков Е.Г., Филиппов А.П.* Нестационарные колебания деформируемых систем. – К.: Наукова думка, 1977. – 336 с.

Поступила в редколлегию 18.06.2008