

УДК 534.014.1 (09)

А. А. Ларин

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

**ИССЛЕДОВАНИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ АВИАМОТОРОВ
ОСНОВАТЕЛЯМИ НЕЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИКИ Н. М. КРЫЛОВЫМ
И Ю. А. МИТРОПОЛЬСКИМ В 1940-е гг**

Присвячено першим практичним застосуванням асимптотичних методів у механіці – розрахункам нелінійних коливань валопроводів авіамоторів. Показано вклад академіків М. М. Крилова і М. М. Боголюбова в удосконалення авіадвигуна М-105, що в роки війни був самим розповсюдженим у радянській авіації.

Ключові слова: М. М. Крилов, М. М. Боголюбов, механіка, асимптотичні методи, авіація.

Деятельность Киевской школы нелинейной механики, основанной академиком Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым, создавшими асимптотические методы расчетов нелинейных колебаний, изучена достаточно подробно. Среди многих других можно назвать фундаментальные труды представителей этой школы, посвященные истории развития математики и механики [1, с. 264–290; 2, с. 115–135]. Для большинства авторов основными источниками исследований творчества всемирно известных киевских ученых являются их публикации. В связи с этим из поля зрения историков науки выпадают годы Великой Отечественной войны, во время которой научные статьи и, тем более монографии, почти не издавались [3, с. 78]. Склады-

© А. А. Ларин, 2009

вается впечатление, что деятельность этих ученых временно была приостановлена.

Принято считать, что асимптотические методы нелинейной теории колебаний сначала успешно применялись в задачах физики, а для механических систем их использовали только в 1950-е гг. В труде «История отечественной математики» Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский и О. Б. Лыкова только вскользь упоминают об их практическом применении для решения задач машиностроения [1, с. 271]. В другом месте этого фундаментального труда, где анализируется применение методов нелинейной механики, сказано, что «одним из первых эффективных применений нелинейной механики при расчетах конструкций является расчет драглайна¹, выполненный в 1953 г. С. А. Казаком». Там же упоминаются исследования колебаний приведенной системы коленчатого вала, выполненные в 1963 г. Н. Н. Боголюбовым и Ю. А. Митропольским [4]. Кроме того, в данной работе пишется о том, что Ю. А. Митропольский в монографии [5], изданной в 1964 г., «исследовал одночастотным методом крутильные колебания коленчатого вала авиационного двигателя при неустановившемся режиме» [1, с. 328]. Однако рядные V-образные авиамоторы, о которых идет речь в работах Боголюбова и Митропольского, в 1960-е гг. уже безнадежно устарели. Авиация к тому времени перешла на газотурбинные двигатели, а из поршневых в основном еще применялись звездообразные. На самом деле упомянутые работы были выполнены в конце 1940-х гг., и в монографиях ученых приводятся только как примеры расчетов нелинейных колебаний механических систем. Более того, есть сведения об удачных применениях асимптотических методов для расчетов крутильных колебаний авиамоторов в 1940 г. и в годы войны, когда от повышения их мощности и ресурса зависели не только результаты воздушных боев, но и судьба победы в войне.

Кафедра математической физики, которую возглавлял академик Н. М. Крылов, организационно входила в состав Института строительной механики. Высокая оценка деятельности кафедры дается в докладной записке Президиума АН УССР Центральному комитету КП(б)У о состоянии академии на 1937 г.: «У складі Інституту будівельної механіки працює кафедра математичної фізики, керує академіком Криловим, яка провадить в основному дослідження в галузі проблем нелінійної механіки. Ці роботи створили основи нелінійної механіки, висвітливши низку теоретичних підвалин цієї нової галузі механіки та їх застосування для розв'язання питань математичної фізики та інженерних наук». Справка подписана президентом АН УССР А. А. Богомольцем [6, ф. 1, оп. 20, ед. хр. 7092, л. 111].

С началом Великой Отечественной войны все учреждения АН УССР были эвакуированы в Башкирию, большинство из них, в том числе и Институт строительной механики, разместились в Уфе [7, 550]. Численность научных сотрудников института сократилась до 29 человек, в основном высшей квалификации. Остальные были мобилизованы в Красную Армию или находились за пределами Уфы. В Группу математической физики, которой руководил член-корреспондент АН УССР Н. Н. Боголюбов, входил, кроме него, еще только один научный сотрудник² [8, ед. хр. 76, л. 2-3]. Вопросы совершенствования авиамоторов были важнейшими, и ученым – математикам, лишенным поддержки своих младших коллег и учеников, пришлось лично заниматься проведением расчетов. Именно по этой причине работы по расчетам нелинейных крутильных колебаний не были опубликованы после войны, в отличие от работ других сотрудников института. Работы прикладного характера не вызывали у Крылова и Боголюбова большого интереса, и с конца войны они занимались более глобальными задачами.

Целью настоящей статьи является более подробное рассмотрение деятельности основателей Киевской школы нелинейной механики Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова и Ю. А. Митропольского в 1940-е гг., а именно – их вклад в решение проблемы колебаний авиамоторов. Поскольку, как уже отмечалось, в научной печати следов деятельности знаменитых ученых не осталось, основным источником для данной работы стали материалы архива Института механики НАН Украины им. С. П. Тимошенко, где сохранилась информация о выполнении научно-исследовательских работ по заказам авиамоторных заводов.

Именно с деятельностью Института строительной механики связано развитие динамических расчетов систем с ДВС в Украине. С приходом туда замечательного ученого и организатора науки С. В. Серенсена институт теснее стал сотрудничать с промышленными предприятиями, особенно авиамоторного профиля. Проблема динамической прочности авиамоторов, важнейшая для обороноспособности страны, особенно в годы войны, была самой важной и для Института строительной механики [3; 9]. В 1940 г. академик С. В. Серенсен ушел с поста директора института, посвятив все свои силы в первую очередь динамике коленчатых валов авиамоторов.

Одной из важнейших задач динамической прочности авиамоторов была задача расчетов крутильных колебаний их валопроводов, приводящих к поломкам не только передач, но даже и коленчатых валов. На рисунке 1 приведена типичная схема валопровода V-образного двенадцатицилиндрового рядного авиамотора. Для расчетов крутильных колебаний строится дискретная модель, при построении которой инерционные свойства системы отражаются маховыми массами с приведенными к валу двигателя моментами инерции, а жесткостные – безынерционными участками с соответствующими крутильными жесткостями. На рисунке 2 показана приведенная модель крутильных колебаний рассматриваемого мотора. Здесь диски с номерами 3-8 представляют собой приведенные к валу обобщенные цилиндрические моменты инерции, на которые действуют гармонические возмущающие моменты, с номером 1 – приведенный момент инерции воздушного винта, 2 – редуктора и 9 – компрессора.

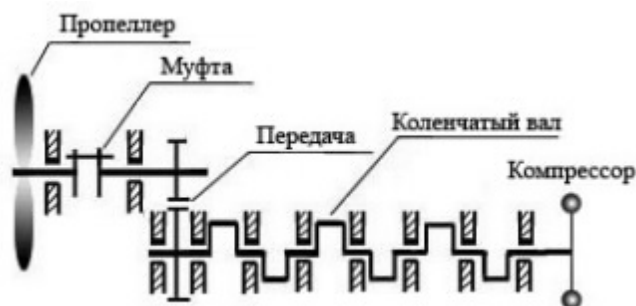


Рис. 1. Схема валопровода V-образного двенадцатицилиндрового рядного авиамотора

Модели валопроводов рядных авиамоторов значительно проще, чем у наземных машин из-за отсутствия коробки перемены передач и представляют собой многомассовую (порядка десяти) неразветвленную дискретную систему. Расчет крутильных колебаний в линейных моделях к концу 1930-х гг. был уже хорошо освоен и мог быть при необходимости проделан в заводских КБ. Однако в рядных авиамоторах крутильная система валопровода включала нелинейности, поскольку пропеллер соединялся с валом двигателя посредством зубчатой передачи, в которой всегда имеется

технологический зазор. Как правило, в редукторе устанавливалась упругая муфта с нелинейной характеристикой. Она служила для смягчения динамических нагрузок и являлась также своеобразным гасителем колебаний [10]. На рисунке 3 приведена типичная характеристика пружинной муфты, имеющая кусочно-линейный вид.

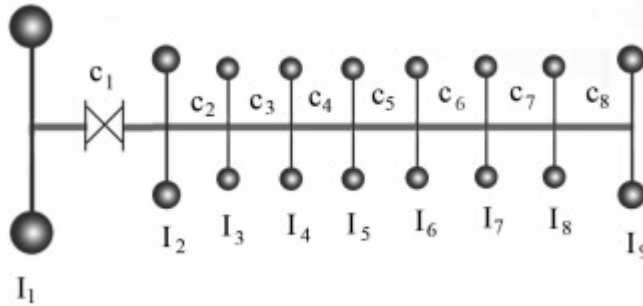


Рис. 2. Модель крутильных колебаний V-образного двенадцатицилиндрового рядного авиадвигателя

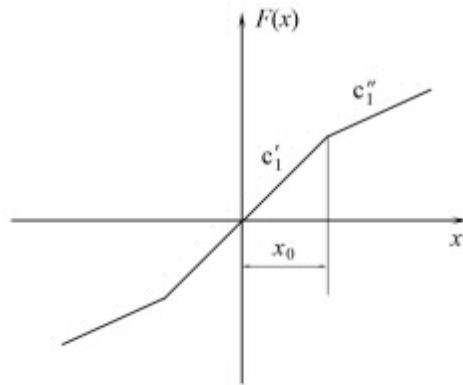


Рис. 3. Кусочно-линейная характеристика упругой муфты

На основе этого способа старший научный сотрудник Института строительной механики И. М. Тетельбаум выполнил под руководством С. В. Серенсена внеплановую работу «Построение резонансных кривых в системах с нелинейными муфтами» [8, ед. хр. 65, л. 20]. Автор, пользуясь методами нелинейной механики, установил непосредственную простую аналитическую зависимость между нелинейной характеристикой упругого элемента системы, взятой в виде полинома пятой степени, и формой резонансной кривой. Это упростило расчет по сравнению с громоздкими графическими методами, еще применяемыми в то время, и облегчило выбор рациональных характеристик ряда упругих элементов, в том числе и муфт. Дифференциальное уравнение динамического равновесия системы с одной нелинейной упругой связью для внутренних крутильных колебаний решалось с помощью метода Пуанкаре. Работа доложена на научной сессии института в феврале 1940 г., а тезисы доклада отпечатаны на пишущей машинке в небольшом числе экземпляров [8, ед. хр. 66,

К тому моменту хорошо освоены были только расчеты нелинейных систем с одной степенью свободы, поэтому исследователи сводили коленчатый вал к одной маховой массе. Однако для быстроходных двигателей такой подход был неприемлем, ввиду того, что собственные частоты колебаний коленчатого вала попадали в рабочий диапазон, при этом узел колебаний образовывался на коленчатом валу. В связи с этим в 1940 г. Н. М. Крыловым и Н. Н. Боголюбовым был разработан новый эффективный способ построения резонансных кривых для нелинейных крутильных колебаний, который позволяет практически осуществить расчеты, весьма важные в авиамоторостроении.

л. 16-19]. Работа была произведена в порядке подготовки тематики 1941 г. и предназначалась для анализа динамики авиационных моторов.

В статье [3, 75-78] мы уже рассказывали, как сотрудники старейшего в Украине института участвовали в совершенствовании авиамоторов, выпускавшихся на эвакуированном в Уфу моторостроительном заводе №26. Основной продукцией завода был новый авиамотор М-105 конструкции В. Я. Климова, выпускавшийся в двух модификациях – обычный, устанавливавшийся на пикирующих бомбардировщиках Пе-2 и пушечный – на всех истребителях конструкции А. С. Яковлева, а также на ЛаГГ-3. В этих работах участвовали и академик Крылов, и член-корреспондент Боголюбов, о чем свидетельствует краткий отчет о ходе выполнения научно-исследовательских работ за III квартал 1941 г. В рамках темы № 17 «Исследование явления резонанса в системах с любым числом степеней свободы», выполненной под руководством Н. М. Крылова, были разработаны принципиальные основы метода построения резонансной кривой для коленчатого вала, в крайних пролетах которого содержатся нелинейные упругие элементы [8, ед. хр. 76, л. 2].

В 1942 г. Институт строительной механики продолжал работать на удовлетворение нужд оборонной промышленности. Одним из направлений тематического плана института являлась нелинейная механика [8, ед. хр. 85, л. 26]. В рамках этого направления Н. М. Крылов и Н. Н. Боголюбов занимались важнейшей задачей о крутильных колебаниях коленчатых валов авиамоторов. О том, насколько опасными могут быть эти колебания, свидетельствуют торсиограммы авиамотора М-105, приведенные в работе [11, 52] и представленные на рисунке 4. На них явно видно две резонансные области – в зоне 1760 об/мин резонирует шестая, главная гармоника, а в зоне 2080 – пятая. Угол закручивания коленчатого вала при этом доходит до $1,3^\circ$, а характер кривых говорит о явно выраженном нелинейном характере резонансных колебаний.

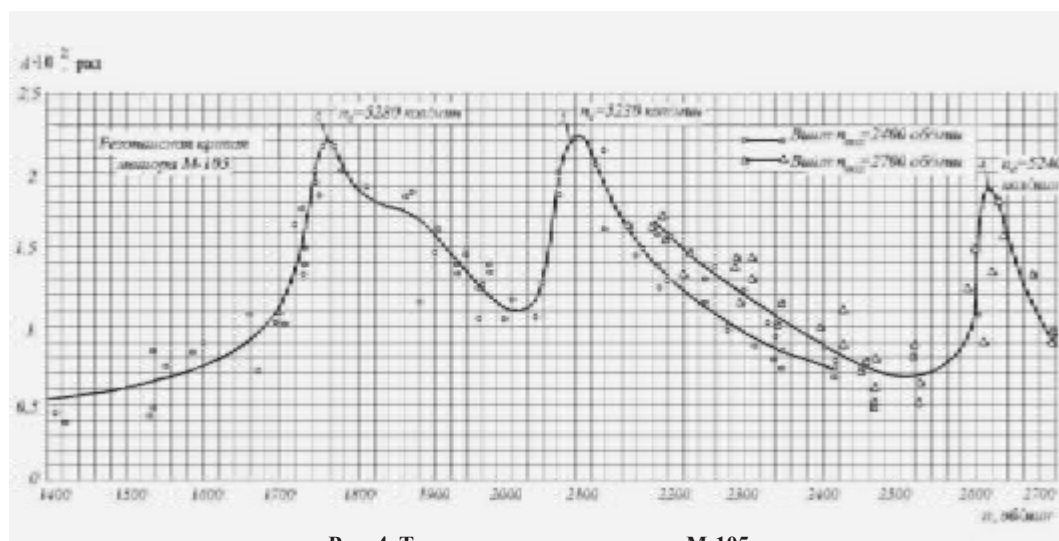


Рис. 4. Торсиограммы авиамотора М-105

Основоположниками нелинейной механики был построен метод, позволяющий из непосредственных энергетических соображений получить для вынужденных колебаний уравнения 1-го и 2-го приближений. Энергетический подход позволяет также по выражению виртуальной работы судить о характере возможных резонан-

сов. Указанный метод был использован при расчетах резонансных крутильных колебаний коленчатых валов и передач авиамоторов с нелинейными муфтами [8, ед. хр. 86, л. 5]. Результаты работы были доложены на декабрьской сессии АН УССР 1942 г. в докладе «Энергетические методы нелинейной механики». В резолюции по нему говорится: «Считать желательным дальнейшее развитие энергетического метода для исследования нелинейных колебательных процессов» [8, ед. хр. 87, л. 49].

Методы Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова для расчетов крутильных колебаний нелинейных систем валопроводов авиамоторов были внедрены не только на авиамоторных заводах, но и в Центральном институте авиационного моторостроения (ЦИАМ). Уже в 1943 г. в работе [12] сотрудник ЦИАМ В. Я. Натанзон применяет эти методы для расчетов крутильных колебаний валопроводов авиационных рядных моторов с нелинейной муфтой.

С переходом С. В. Серенсена и И. М. Тетельбаума в ЦИАМ [3, 77], центр тяжести расчетов коленчатых валов переместился туда, однако нелинейные колебания валопроводов авиамоторов по-прежнему оставались одним из вопросов, которыми занималась кафедра математической физики Института строительной механики. В отчете по теме, выполненной в 1949 г. Ю. В. Благовещенским и Ю. А. Митропольским, под руководством Н. Н. Боголюбова, изложены методы исследования нелинейных систем с большой нелинейностью. При помощи этих методов можно исследовать как системы с постоянными, так и с медленно меняющимися параметрами. Рассмотрены крутильные колебания вала при наличии трения и включенной в систему муфты с нелинейной упругой характеристикой [13, с. 64-66].

Поскольку избавиться от резонансных колебаний в рабочем диапазоне авиамотора не представляется возможным, важнейшей задачей стало исследование прохождения через резонанс. В докторской диссертации Ю. А. Митропольского, посвященной нестационарным колебаниям нелинейных систем со многими степенями свободы, в качестве примера рассматриваются вынужденные колебания валопровода авиамотора при прохождении через резонанс. Крутильная система, схема которой приведена на рисунке 2, содержит муфту, с кусочно-линейной характеристикой, см. рисунок 3 [14, с. 132]. Хотя марка мотора не указывается, идентифицировать его удалось по книге И. Ш. Неймана, в которой приведены эти же исходные данные, но указан тип двигателя – авиамотор В. К. Климова М-105 [11, с. 51].

В своей работе Ю. А. Митропольский исследовал поведение данной системы при различных режимах прохождения через резонанс. На рисунках 5 и 6 приводятся зависимости амплитуд колебаний носка вала авиамотора М-105 от оборотов двигателя, соответственно при медленном и быстром проходе через резонанс с возрастанием и убыванием оборотов двигателя. При этом зависимость частоты возмущающих сил от времени предполагается линейная [14, с. 112].

При медленном проходе амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) переходного процесса практически повторяют АЧХ, полученные для установившегося режима. В случае же быстрого прохождения через резонанс кривые значительно отличаются от стационарной кривой и по своему характеру больше напоминают прохождение через резонанс в линейной системе. При анализе полученных результатов Юрий Алексеевич сделал ряд важных выводов о поведении нелинейных систем при различных вариантах прохождения через резонанс [14, с. 153-158].

Анализ документов архива Института механики НАН Украины позволил сделать вывод о том, что асимптотические методы расчетов нелинейных колебаний эффективно применялись для важнейшей задачи – исследования крутильных колебаний валопроводов авиамоторов. Особенно важными были расчеты авиамотора М-105,

который на протяжении всей войны был основным двигателем для советских истребителей, а также применялся и на бомбардировщиках [3, 75]. Именно совершенствование авиадвигателя М-105 обеспечило советской авиации завоевание превосходства в воздухе в 1943 г. В этом большая заслуга сотрудников института строительной механики АН УССР, в том числе и академиков Н. М. Крылова и Н. Н. Боголюбова [3, 76-77].

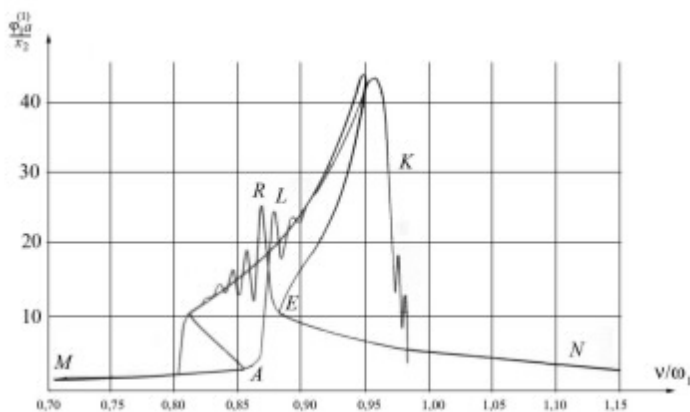


Рис. 5 Амплитудно-частотная характеристика носка вала авиадвигателя М-105 при медленном проходе через резонанс

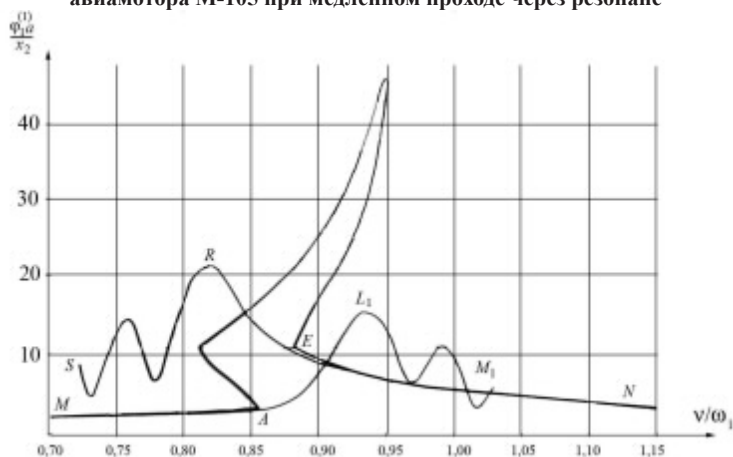


Рис. 6 Амплитудно-частотная характеристика носка вала авиадвигателя М-105 при быстром проходе через резонанс

Библиографические ссылки

1. История отечественной математики. Т. 4, кн.2. 1917-1967.– К., 1970.– 668 с.
2. Механика в СССР за пятьдесят лет. Т. 1 Общая и прикладная механика.– М., 1968. – 416 с.
3. Ларин А. А. Деятельность Института строительной механики АН УССР в области динамической прочности в 1930-1940-е гг. / А. А. Ларин // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: История науки и техники. – Х., 2008 –№ 53. – С. 67-79.
4. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – Изд. 3-е.– М., 1963 д–410 с.

5. **Митропольский Ю. А.** Проблемы асимптотической теории нестационарных колебаний / Ю. А. Митропольский – М., 1964.– 431 с.
6. Фонды Центрального Государственного Архива общественных объединений Украины.
7. **Ильгамов М. А.** Как путники у общего костра Академия наук Украинской ССР в Башкирии в годы Великой Отечественной войны /М. А. Ильгамов. М. А. Саитова // Вестник Российской АН. – 2001. – Т. 71, № 6. – С. 550-559.
8. Фонды архива Института механики НАН Украины, опись № 1.
9. **Ларин А. А.** История развития методов динамических расчетов коленчатых валов / А. А. Ларин, Ю. Л. Тарсис // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: Динамика и прочность машин. – Х., 2008 – № 47. – С. 3-13.
10. **Ларін А. О.** Оптимізація параметрів нелінійної муфти валопроводу транспортного дизельного двигуна / А. О. Ларін, С. М. Решетнікова // Вісник Академії митної служби України. – Д., 2008 – № 2 (38). – С. 83-89.
11. **Нейман И. Ш.** Крутильные колебания многомассовой нелинейной системы. / И. Ш. Нейман – М.-Л., 1947.– 132 с.
12. **Натанзон В. Я.** Крутильные колебания коленчатых валов с муфтами, обладающими нелинейными характеристиками / В. Я. Натанзон // Труды ЦИАМ. – 1943.– № 40.– 80 с.
13. Фонды архива Института механики НАН Украины, опись № 2.– Исследование колебательных процессов в системах с большой нелинейностью. Отчет по теме. – Киев, 1949. – 71 с.
14. **Митропольский Ю. А.** Медленные процессы в нелинейных колебательных системах со многими степенями свободы: дис на соискание ученой степени док. техн. наук.– К., 1950.– 199 с.

Надійшла до редколегії 05.03.09