

МЕТОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИССЛЕДОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ АВИАМОТОРОВ В СССР В 1940-Е ГГ.*А. А. Ларин**Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт», Харьков
E-mail: larinpokotilovka@mail.ru*

В ряде работ [1, с. 282–311; 2] мы уже рассказывали о решении важнейшей оборонной задачи – исследовании колебаний поршневых авиамоторов, с которой советские инженеры столкнулись в конце 1930-х гг. Мощность авиамоторов достигла 1000 л.с. при сохранении сравнительно небольших габаритов. Это вызвало появление новых для ученых-механиков проблем, связанных с расчетом колебаний.

При создании рядных бензиновых авиамоторов и судовых дизелей с достаточно длинными коленчатыми валами (шесть колен и более), в них при крутильных колебаниях стали деформироваться коленчатые валы. Это потребовало при расчете рассматривать системы с десятью и более степенями свободы. Хотя методы расчетов свободных и вынужденных колебаний именно таких систем, имеющих цепную структуру, были развиты неплохо, они требовали достаточно большого объема вычислений, что затрудняло решение задачи их синтеза по вибрационным характеристикам. Наличие же в системе нелинейных элементов – муфт, демпферов или антивибраторов, а также технологических нелинейностей, например, зазоров в зубчатых передачах или шлицевых соединениях, зачастую делало невозможным их расчет в многомассовой постановке. Это вынуждало рассматривать систему с одной степенью свободы, что позволяло получать только качественные результаты.

Новой проблемой стали также связанные изгибно-крутильные колебания, возникающие из-за влияния изгиба пропеллера на крутильные колебания валопровода. Все это усложняло расчеты, которые исследователи вынуждены были проводить с помощью ручных методов.

Даже с внедрением в расчетную практику ЭВМ, пока их возможности были ограничены, проведение многих видов расчетов колебаний оставалось проблемой. Это, в первую очередь, касается расчетов нелинейных колебаний и колебаний систем большой размерности. Поэтому наряду с численными методами расчета применялись аналоговые вычислительные машины (АВМ), в которых физическим способом выполняются математические операции: сложение, умножение, дифференцирование, интегрирование и т.п. АВМ имеют набор операционных блоков, предназначенных для выполнения различных операций. Решение уравнений на АВМ заключается в составлении соответствующей структурной схемы, в которой указывается необходимая связь между блоками машины.

Однако электрическая расчетная аппаратура успешно применялась во многих областях техники еще до создания АВМ. Это были специализированные стенды, предназначенные для исследования динамики ограниченных классов машин. Методы электромеханических аналогий сыграли важную роль в развитии отечественного двигателестроения.

Еще Дж. К. Максвелл заметил, что подобно тому, как при колебаниях механической системы происходит перекачка потенциальной энергии в кинетическую, при колебаниях в электромагнитной системе энергия магнитного поля преобразуется в энергию электрического поля. Максвелл уподобил энергию магнитного поля электрической системы кинетической энергии, а энергию электрического поля – потенциальной. Этим были заложены основы, так называемой, первой системы электромеханических аналогий. При использовании второй системы, наоборот, энергия магнитного поля уподобляется потенциальной энергии, а энергия электрического поля – кинетической.

Идея замены громоздких вычислений измерением электрических величин с помощью электромеханических аналогий возникла 1930-е гг. Моделирование происходящих в двигателях колебательных процессов производится с помощью специально собранной эквивалентной электрической цепи. В основе этого моделирования лежат свойства электромагнитных колебаний, описываемых теми же самими дифференциальными уравнениями, что и колебания механической системы.

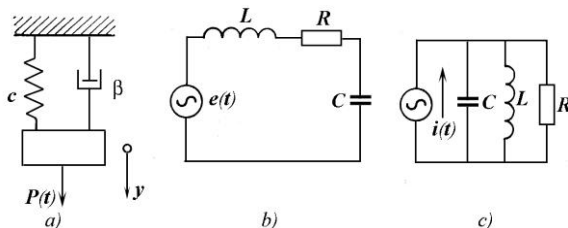


Рис. 1. Схемы простейшей механической системы (поз. а) и ее электрических аналогов по первой (поз. б) и второй (поз. в) системам электромеханических аналогий

Целью данной статьи является исследование истории применения электромоделирования для изучения крутильных колебаний валопроводов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) – важнейшей практической задачи прикладной теории колебаний.

Одной из ведущих организации в Советском Союзе в области прочности авиамоторов был Институт строительной механики АН УССР, располагавшийся в Киеве [2]. Среди работ ученых Института строительной механики АН УССР, посвященных динамической прочности авиамоторов, выделяются работы старшего

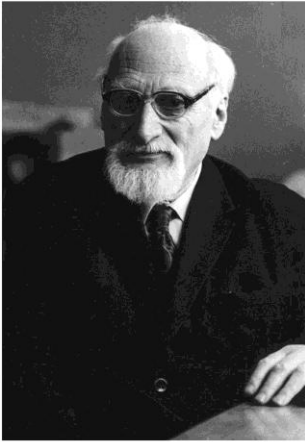


Рис. 2. І. М. Тетельбаум

научного сотрудника, кандидата технических наук И. М. Тетельбаума (1910–1992). Илья Маркович одним из первых в мире применил для исследования колебаний валопроводов авиамоторов метод электро моделирования. В начале 1940-х гг. он разработал теорию электрического моделирования крутильных колебаний валопроводов поршневых двигателей. На июльской сессии АН УССР 1942 г., проводившейся в Уфе, куда были эвакуированы почти все ее институты, Илья Маркович выступил с докладом «Новый метод определения расчетных усилий в валах авиационных и судовых рядных двигателей путем электромеханического моделирования». В этом докладе он предложил конструкцию расчетного стенда, состоящего из электрической модели рядного двигателя, составляемой из дросселей и конденсаторов, фотоэлектрического датчика импульсов тангенциальных усилий и измерительного

устройства. Аналитический расчет крутильных колебаний валопроводов указанных двигателей предполагалось заменить осциллографированием напряжений или токов в отдельных ячейках модели двигателя. В докладе был приведен анализ принципов моделирования, рассматривались элементы установки и их технические характеристики. Автор рассматривал этот метод в качестве «радикального способа упрощенного определения расчетных усилий» при колебаниях валопровода [3, л. 7].

В резолюции по докладу И. М. Тетельбаума были отмечены эффективность предлагаемого стенда, позволяющего заменить громоздкие вычисления измерениями на электрической модели. Сессия технического отделения АН УССР приняла решение: «Обратиться совместно с ЦИАМом* в НКАП** с предложением о скорейшем создании таких стендов в системе НКАП и в Институте строительной механики АН УССР и организовать в последнем на базе стенда лабораторию динамических исследований» [3, л. 24–25]. Однако И. М. Тетельбаум перешел на работу в ЦИАМ, и электрический расчетный стенд был создан только там. Подробный анализ исследований крутильных колебаний с помощью данного стенда приведен в статье И. М. Тетельбаума [4]. Он позволял задавать параметры электрической модели с точностью до 1%, что превосходит точность определения расчетных значений элементов механической модели при рассмотрении реальной конструкции с учетом упрощающих модель допущений. Кроме того, данная

* ЦИАМ – Центральный институт авиационного моторостроения

** НКАП – Народный комиссариат авиационной промышленности

методика позволяет легко варьировать параметрами системы, внося лишь небольшие изменения в конструкцию стенда. Этот стенд был одним из первых в мире и успешно применялся в военные и послевоенные годы. За несколько лет на нем была исследована динамика 50 рядных авиамоторов. При помощи стенда не только были проведены подробные исследования распределения динамических нагрузок в коренных и шатунных шейках коленчатых валов авиамоторов, но и разрешен ряд других актуальных задач [4, с. 164–165].

Наибольшую трудность при исследовании линейных систем валопроводов авиамоторов представляет учет маятниковых антивибраторов и изгибных колебаний упругого винта, связанных с крутильными колебаниями валов. Для маятниковых антивибраторов, работающих в поле центробежных сил, соответствующие емкости конденсаторов должны изменяться обратно пропорционально квадрату числа оборотов двигателя. Для электро моделирования упругого винта используется метод динамических жесткостей, согласно которому винт характеризуется его резонансными и антирезонансными частотами.

Большой интерес представляет расчет нелинейных колебаний, поскольку подбор электрической схемы для моделирования нелинейных элементов представляет особую трудность. Зачастую приходится удовлетворяться лишь приблизительным соответствием характеристик или ограничиваться применением линейных моделирующих устройств в сочетании с аналитическими методами линеаризации.

Для получения жестких упругих характеристик удобнее вторая система аналогий, при которой за счет использования нелинейных свойств ферромагнитных материалов, кривые намагничивания которых позволяют получить требуемые характеристики. И. М. Тетельбаум получал жесткие характеристики с помощью дросселей с сердечниками из пермаллоя (железо-никелевый сплав).

Сухое трение моделируется с помощью газоторонов (при использовании 1-й системы аналогий) или электронных ламп в режиме насыщения (2-я система) [4, с. 151–152]. В последующие годы И. М. Тетельбаумом была разработана теория электромеханического моделирования изгибных и связанных изгибно-крутильных колебаний, а также расчета статически неопределимых систем.

Доктор технических наук, профессор Илья Маркович Тетельбаум является одним из основоположников теории электронного моделирования сложных систем. С 1950 г. он работает в Московском энергетическом институте, где наряду с развитием методов электрического моделирования занимается общей теорией аналоговых вычислительных машин. Ряд научных результатов ученого получил широкое признание среди специалистов не только в СССР, но и за рубежом [5].

После перехода авиации на газотурбинные двигатели многие специалисты, занимавшиеся поршневыми авиамоторами, перешли на создание наземных силовых установок с ДВС. Среди них самыми сложными являются силовые установки тепловозов. Именно для тепловозов нашел применение метод электромеханических аналогий. В качестве примера в докладе приводится работа доцента Харьковского

інститута інженерів залізничного транспорту (сейчас Українська академія залізничного транспорту) Юрія Леонідовича Фаворова, посвяченна дослідженню крутильних коливань в тепловозних двигачах типу Д100 методом електромеханічних аналогій [6; 7].

С розвитком вичисельної техніки, дозволяючої отримувати точні рішення для лінійних систем, застосування методів електромеханічних аналогій при розрахунку вільних і вимушених установившихся коливань стало нецелесообразним. Для розрахунків перехідних режимів і нелінійних коливань, ввиду складності алгоритмів і високої вартості машинного часу, ще довго знаходили застосування АВМ.

Що стосується методу електромеханічного моделювання, то к початку 1960-х гг. він уже втратив свою ефективність. Це демонструється порівнянням розрахунків силової установки тепловоза, проведених на Луганському тепловозобудівельному заводі імені Октябрської революції [8] з розрахунками, проведеними автором даної статті.

Література

1. Ларин А. А. Очерки истории развития теории механических колебаний / А. А. Ларин. – Севастополь: Вебер, 2013. – 403 с.
2. 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 «ХПИ». - История науки и техники, 2008. – Вып. 53. – С. 67–79
3. Архив Института механики Национальной академии наук Украины, оп. 1, ед. хр. 87, 52 л.
4. Тетельбаум И. М. Электрическое моделирование как метод исследования динамических крутильных нагрузок валов поршневых двигателей. / И. М. Тетельбаум // Динамика и прочность коленчатых валов. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1948. – С. 140–169
5. http://publ.lib.ru/ARCHIVES/T/TETEL'BAUM_I'ya_Markovich/_Tetel'baum_I.M..html
6. Фаворов Ю. Л. Исследование крутильных колебаний в тепловозных двигателях Д100 методом электромеханических аналогий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Юрий Леонидович Фаворов. – Харьков, 1958. – 15 с.
7. Архив Украинской академии железнодорожного транспорта. – Личное дело. Фаворов Юрий Леонидович. – Начато – не указано. – Окончено – 1980. – 102 л.
8. Центральный государственный научно-технический архив Украины, ф. 25, оп. 2, ед. хр. 58. – 25 л.