

УДК 533.6.013.42

ПОРТАТИВНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ГИСТЕРЕЗИСА

М.Н. Деменков

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65

E-mail: britain.scientist@yandex.ru

Ключевые слова: нелинейные колебания, аэроупругие системы, модели гистерезиса, робототехника и мехатроника.

Аннотация: В докладе описывается учебная установка для изучения аэроупругих колебаний, собранная из доступных робототехнику-любителю деталей, таких как микроконтроллер Ардуино, вентилятор и гибкий тензорезистор, меняющий свое сопротивление при изгибе, к которому присоединена пластиковая пластина, играющая роль крыла. Установка позволяет осуществлять сбор и анализ данных на компьютере. Эксперименты с установкой демонстрируют жесткое возбуждение и последующее мягкое затухание колебаний в диапазоне скорости потока 3-5 м/с, а также дивергенцию пластины. Выявлен эффект вязкоупругого гистерезиса тензорезистора. Для корректного наблюдения угла отклонения необходима идентификация математической модели гистерезиса.

1. Введение

Аэроупругие колебания (флаттер) возникают в результате взаимодействия упругой механической конструкции (например, крыла самолета, лопасти турбокомпрессора или лопасти ветрогенератора) и набегающего потока воздуха. Периодические колебания конструкции потенциально ведут к ее разрушению. Для исследования этого явления в лабораторных условиях обычно используются аэродинамическая труба и установленный в ней макет изучаемой конструкции, массовое использование которых в университетском учебном процессе по сути невозможно. Однако, современный уровень развития любительской робототехники уже позволяет воспроизвести эффект флаттера с помощью широко используемых там компонентов [1].

Основой для описанной в докладе установки послужило устройство под названием Flexu, разработанное в Словацком технологическом университете для обучения студентов основам автоматического управления [2]. В оригинальной версии установки воздушный поток вентилятора (Sunon PMD1204PQB1-A) направлен снизу вверх и отклоняет на некоторый угол пластиковую пластину, лежащую на нем и прикрепленную к тензорезистору (Spectrasymbol Flex Sensor 4.5"). Линеаризованная модель такой установки описывается аperiodическим звеном 1-го порядка. Чертежи (как и электрические схемы) Flexu доступны по адресу [3] и предназначены для изготовления лазерной резкой.

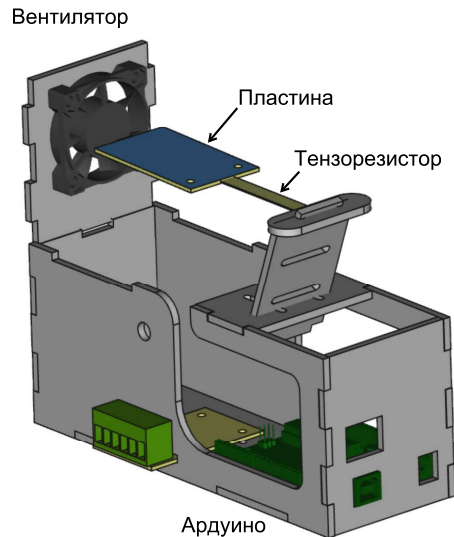


Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки (габариты $20 \times 6 \times 13$ см, размеры пластины 5×4.5 см).

В модифицированной нами версии (рис. 1) пластина установлена перпендикулярно вентилятору в горизонтальной плоскости. Угол отклонения пластины является нелинейной функцией сопротивления тензорезистора, измеряемого с помощью микроконтроллера Arduino Uno. Тензорезистор также является и плоской пружиной, в отсутствие подъемной силы возвращающей пластину в исходное положение после отклонения. Микроконтроллер управляет и скоростью вращения вентилятора с помощью ШИМ. Обмен данными с компьютером происходит по интерфейсу USB текстовыми командами. Постоянное питание установки осуществляется стандартным импульсным выпрямителем ($12\text{В} - 1.5\text{А}$).

2. Анализ аэроупругих колебаний

На рис. 2 изображены результаты частотного анализа колебаний (с помощью быстрого преобразования Фурье) в зависимости от скорости воздуха на выходе вентилятора. Скорость вентилятора изменялась в диапазоне от 3000 до 9000 об/мин с шагом 200. При каждом изменении колебания наблюдались после 4 секунд, данных на их установление, и в течение 2 секунд. Измеряемой (с частотой 100 Hz) величиной в данном случае является угол атаки α — угол между потоком воздуха и пластиной. Жесткое возбуждение колебаний достаточно большой амплитуды происходит примерно в районе 3.2 м/с. После увеличения амплитуды и последующего мягкого затухания колебаний возникает явление дивергенции — отклонения пластины на достаточно большой угол без колебаний. При этом, угловое отклонение пластины здесь определяется весьма приблизительно по статической характеристике сопротивление-угол. В целом, поведение установки вполне соответствует явлениям, наблюдающимся и в полноразмерных моделях (возникновение колебаний может быть связано с бифуркацией Хопфа предельного цикла в нелинейной системе [4, 5]).

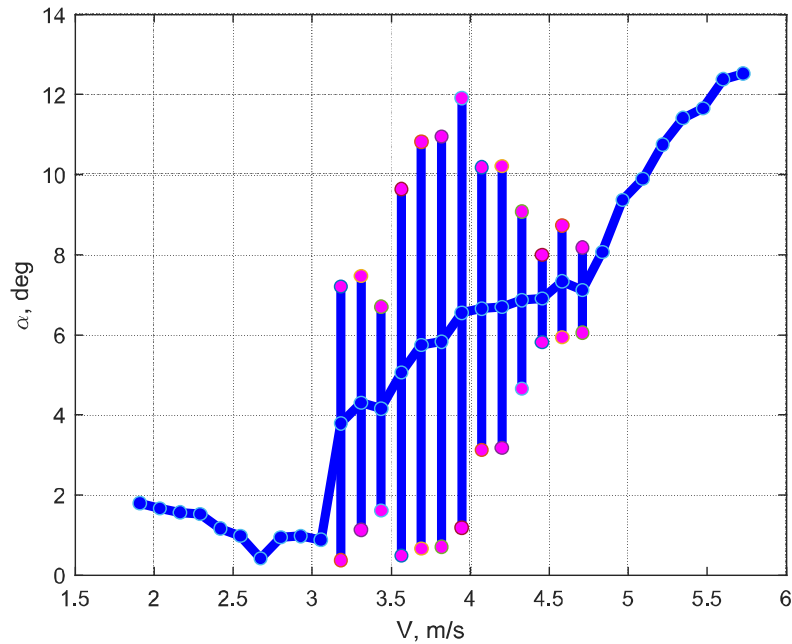


Рис. 2. Постоянная составляющая (непрерывный график) и двойная максимальная амплитуда гармоник (вертикальные полосы) в зависимости от скорости воздушного потока.

3. Определение гистерезисной характеристики

Используемый нами тензорезистор представляет собой пластиковую полоску, на одной стороне которой напечатаны так называемые полимерные чернила, содержащие проводящие частицы. Расстояние между частицами определяет электрическое сопротивление датчика, и зависит от степени его изгиба. В то же время, известно, что полимеры обладают вязкоупругими свойствами [6]. Мы модифицировали устройство таким образом, чтобы их можно было определить экспериментально.

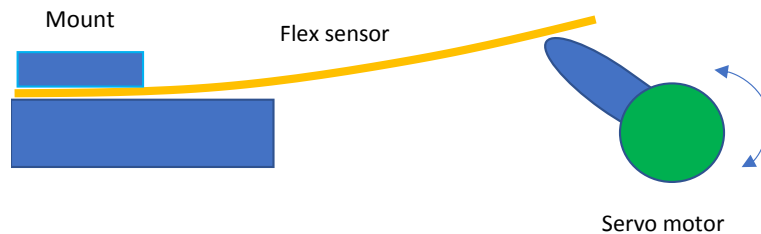


Рис. 3. Схема устройства для определения гистерезиса

В нашем втором эксперименте, небольшая овальная пластиковая деталь прикреплена к сервомотору SG-90 и касается снизу тензорезистора (рис. 3). Это дает возможность отклонять его на точно известный угол с различной скоростью. Как оказалось, скорость отклонения тензорезистора серьезно влияет на сопротивление

(т.е. при одном и том же угловом положении пластины показания датчика зависят от предыстории движения). На рис. 4 изображена петля гистерезиса при различных угловых скоростях (малиновый график соответствует наибольшей, а синий — наименьшей скорости).

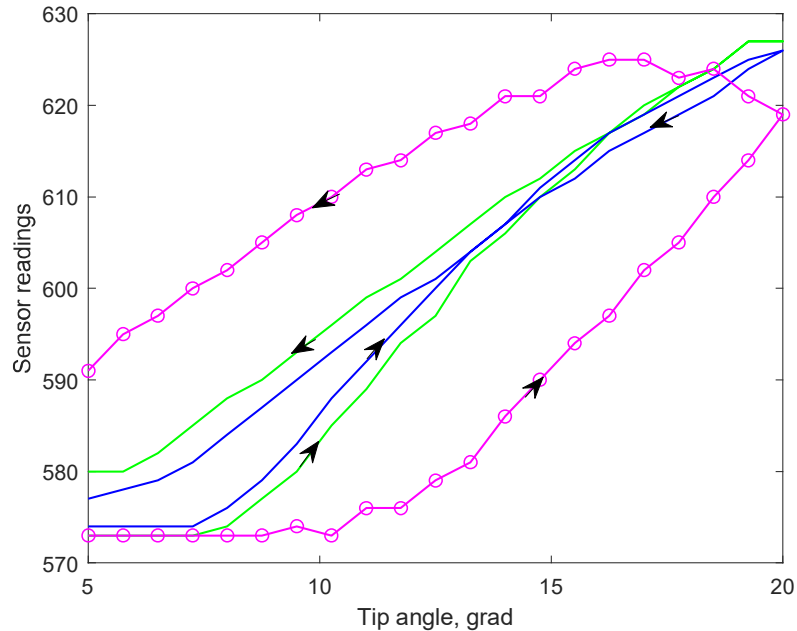


Рис. 4. Петля гистерезиса сопротивления при различных скоростях сервомотора

Заметим, что хорошо известные нелинейные математические модели гистерезиса, такие как модель Прандтля-Ишлинского или Красносельского-Покровского [7], вообще не включают в себя зависимость от скорости, и не годятся для описания вязкоупругого поведения полимеров. В теории полимеров, в то же время, известна только линейная модель Зенера [6].

4. Заключение

Подобная простая и дешевая установка может найти применение в университетском учебном процессе, как в специализированных курсах аэроупругости, так и в курсах нелинейной динамики и управления. Ее преимуществом является возможность индивидуального экспериментального исследования для каждого студента. Однако, существенную проблему представляет гистерезис в показаниях датчика изгиба, обусловленный вязкоупругим поведением его полимерной основы. В настоящее время видятся два пути преодоления этой сложности — первый состоит в идентификации математической модели гистерезиса и реализации нелинейного наблюдателя состояния на ее основе, второй — в изменении конструкции установки, например, замене датчика изгиба на потенциометр при увеличении мощности вентилятора и утяжелении пластины, закрепленной в таком случае на обычной (витой) пружине.

Более подробно обе модификации установки и наблюдавшиеся экспериментальные результаты описаны автором в публикациях по результатам Поляховских чтений в г. Санкт-Петербург [8] и конференции MURPHYS-HSFS в г. Барселона [9].

Список литературы

1. Момот М. Мобильные роботы на базе Ардуино. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2018.
2. Kalúz M, Āirka L, Fikar M. Flexy: an Open-source Device for Control Education // Proceedings of the 13th APCA International Conference on Control and Soft Computing (CONTROLO). Univesrity of the Azores, Ponta Delgada, Portugal, 2018.
3. <https://github.com/martin-kaluz/flexy-arduino/wiki>
4. Dimitriadis D. Introduction to nonlinear aeroelasticity. Wiley, 2017.
5. Demenkov M., Goman M. Bifurcation Control of Aeroelastic Limit Cycle Oscillations // IFAC Proceedings Volumes. 2009. Vol. 42, No. 7. P. 355-360.
6. Уорд И. Механические свойства твердых полимеров. М.: Химия, 1975.
7. Красносельский М.А., Покровский А.В. Системы с гистерезисом. М.: Наука, 1983.
8. Demenkov M. Studying Aeroelastic Oscillations with Tensoresistor and Arduino // AIP Conference Proceedings. 2018. Vol. 1959. No. 1.
9. Demenkov M. Experimental Investigation of Viscoelastic Hysteresis in a Flex Sensor // Research Perspectives CRM. Barcelona, Summer 2018. Vol. 11 in Trends in Mathematics. Springer-Birkhauser.