

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ РЕССОРЫ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНОЙ ВИБРОИЗОЛЯЦИЕЙ

**Г.А. Косов**

*Самарский университет им. С.П. Королева*  
Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: germankosov@inbox.ru

**Г.М. Макарьянц**

*Самарский университет им. С.П. Королева*  
Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34  
E-mail: makaryants@ssau.ru

**Ключевые слова:** пневматическая рессора, логарифмические частотные характеристики, активная виброизоляция

**Аннотация:** В работе представлена идентификация динамических характеристик пневматической рессоры с помощью передаточных функций по управляющему воздействию в системе активной пневматической виброизоляции в диапазоне частот от 0,25 до 30 Гц.

## 1. Введение

Для проектирования системы автоматического регулирования и внедрения в нее регулятора с предсказуемым поведением в современной теории автоматического управления недостаточно знать динамику системы в целом, если в системе есть элементы, обладающие существенной нелинейной природой [1]. Система активной пневматической виброизоляции включает в себя оборудование, для которого требуется идентификация передаточных функций, чтобы выбрать вид регулятора и в последующем его спроектировать [2].

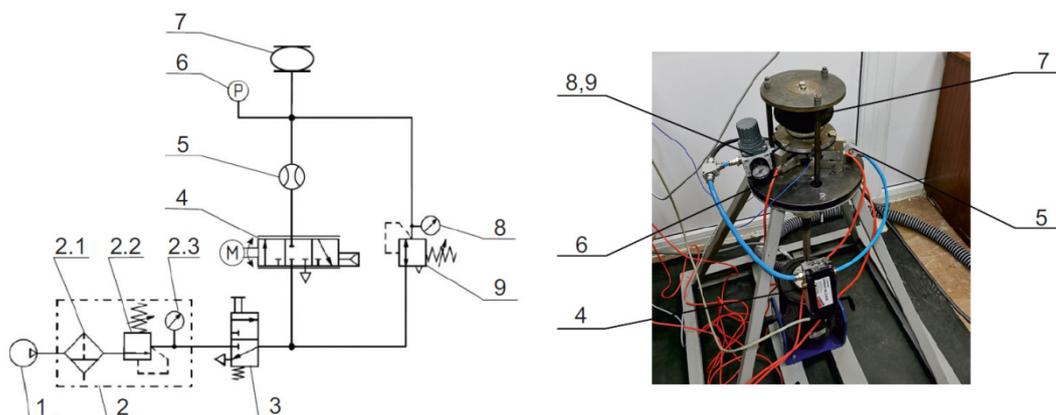
Элементом с неоднозначной передаточной функцией является пневматическая рессора FS 40-6 CI, являющаяся объектом управления. С точки зрения механики рессору можно представить в виде пружины, описываемой передаточной функцией первого или второго порядка [3], или пневматического поршня, описываемого интегратором [4]. Также рессора заключает в себе сжатый воздух и представляет собой ресивер с точки зрения пневматики [5].

Для определения передаточной функции проводится идентификация с помощью логарифмических частотных характеристик. Данная методика позволяет определить не только динамику объекта управления в виде рессоры в составе системы, но и чувствительных элементов, так как их виды передаточных функций хорошо известны [6]. Описание исполнительно механизма, используемого в системе активной виброизоляции, дано в технической документации [7].

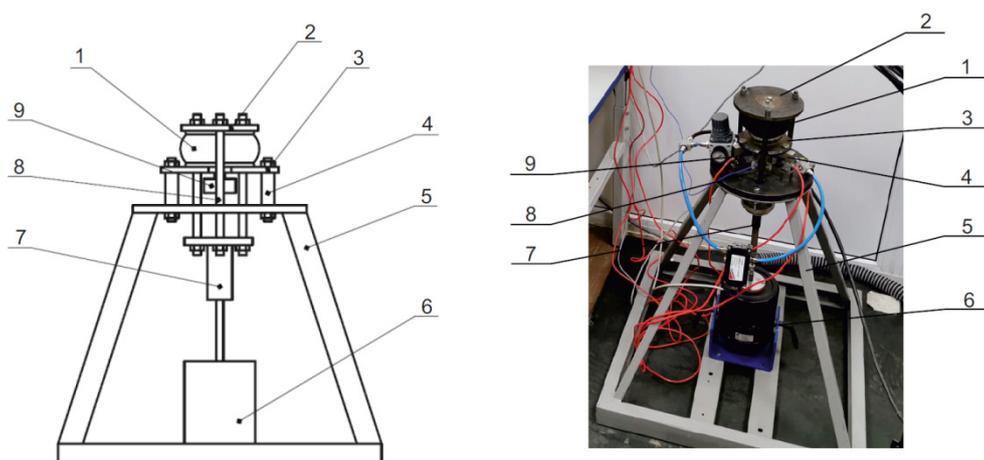
## 2. Описание эксперимента

## 2.1. Экспериментальный стенд

Пневматическая схема экспериментального стенда (рис. 1) включает в себя: исполнительный механизм – пропорциональный 3/3 пневматический сервораспределитель LRWA2-34-3-A-00 поз. 4; объект управления – пневматическая рессора FS 40-6 CI поз. 7; чувствительные элементы – пьезодатчик давления PCB 101A6 и резистивный датчик давления PSE560-02-28 поз. 6. Также установлены 3 тензодатчика ТОКВЕС STA 250 (рис. 2).



**Рис. 1.** Пневматическая схема и фотография экспериментального стенда с указанием элементов схемы. 1 – компрессор, 2 – блок подготовки воздуха, 2.1 – фильтр с отводом конденсата, 2.2 – редуктор давления, 2.3 – манометр, 3 – 3/2 распределитель, 4 – пропорциональный 3/3 пневматический сервораспределитель LRWA2-34-3-A-00, 5 – расходомер PF2M725-6C-E-M / расходомер PF2A521-F03-1, 6 – пьезодатчик давления PCB 101A06 и резистивный датчик давления PSE560-02-28, 7 – пневматическая рессора FS40-6 CI, 8 – манометр, 9 – редуктор давления MC202-R00.



**Рис. 2.** Схема и фотография экспериментального стенда с указанием элементов схемы. 1 – пневматическая рессора FS 40-6 CI, 2 – подвижный диск, 3 – неподвижный диск, 4 – тензодатчики ТОКВЕС STA 250, 5 – станина, 6 – генератор вибраций The Modal Shop 2075E, 7 – удлинитель штока, 8 – шпильки, 9 – разветвитель.

Работа стенда осуществляется по следующему алгоритму: в систему подается давление 4 бара; с помощью редуктора MC202-R00 устанавливается давление 2 бара в

пневматической рессоре; подается сигнал на пропорциональный сервораспределитель, и он занимает заданное положение, нагнетая давление в рессору; фиксируются данные с датчиков. Шток генератора вибраций, удлинитель штока, шпильки и подвижный диск выполняют роль нагрузки на пневматическую рессору, т.е. в ходе идентификации нагрузка является постоянной.

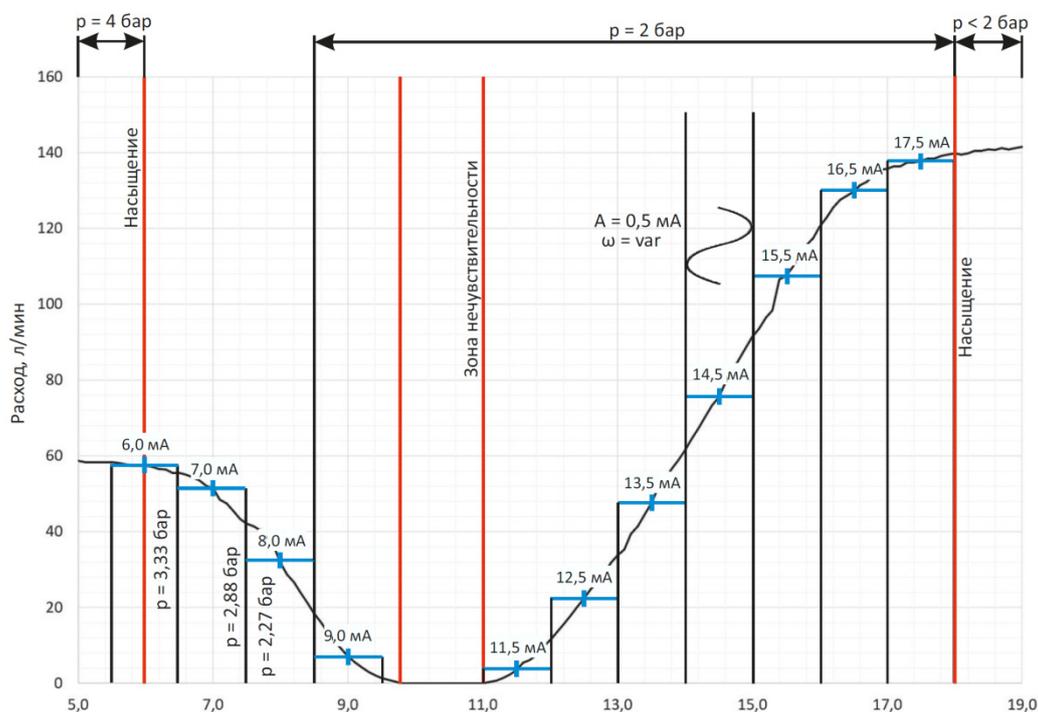
Система управления стенда и регистрации данных реализована на контроллере NI 9023 и высокоскоростных модулях сбора данных и генерации управляющих сигналов.

Важно принять во внимание, что редуктор MC202-R00 может выполнять также функцию дросселя во время работы в обратном направлении и, в этом случае, не обладает инерционностью.

## 2.2. Методика идентификации

В работе используется частотный метод идентификации, так как есть возможность генерировать входное воздействие синусоидальным сигналом, изменяя частоту в широком диапазоне – до 100 Гц.

Для задания входного воздействия на систему с помощью пневматического пропорционального 3/3 сервораспределителя LRWA2-34-3-A-00 экспериментально определена его статическая характеристика в составе схемы стенда, которая представляет собой зависимость расхода (выходной сигнал) и электрического тока (входной сигнал), т.е. так называемая расходная характеристика. Далее расходная характеристика аппроксимируется кусочно-линейной функцией (рис. 3).

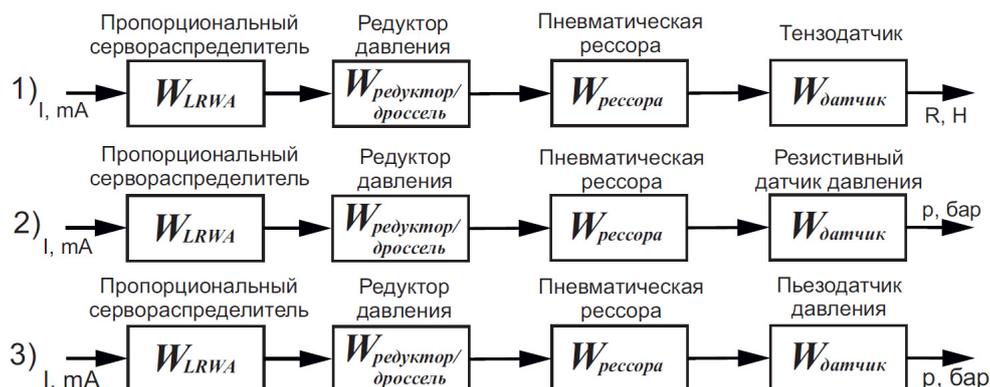


**Рис. 3.** Расходная характеристика пневматического пропорционального 3/3 сервораспределителя LRWA2-34-3-A-00 в составе экспериментального стенда с указанием на ней кусочно-линейной функции, параметров синусоидального сигнала, границ зон нелинейной работы распределителя.

В эксперименте регистрируется генерируемый синусоидальный сигнал и отклик системы на него. Отклик анализируется по данным с трех чувствительных элементов: пьезодатчиком давления, резистивным датчиком давления и тензодатчиками,

объединенными в единую систему для измерения силы. Все эксперименты проходят при пятикратном повторе. После обработки данных с помощью спектрального анализа и нахождения плотности мощности спектра в программном пакете MATLAB строятся логарифмические частотные характеристики. По найденным характеристикам определяются вид и параметры передаточных функций.

Таким образом идентифицируется сразу три схемы, показанные на рис. 4, в которых известны передаточные функции следующих элементов: пропорционального сервораспределителя, редуктора давления, пневматической рессоры, тензодатчика, резистивного датчика давления, пьезодатчика давления. Следовательно, во всех трех схемах неизвестна только передаточная функция пневматической рессоры.

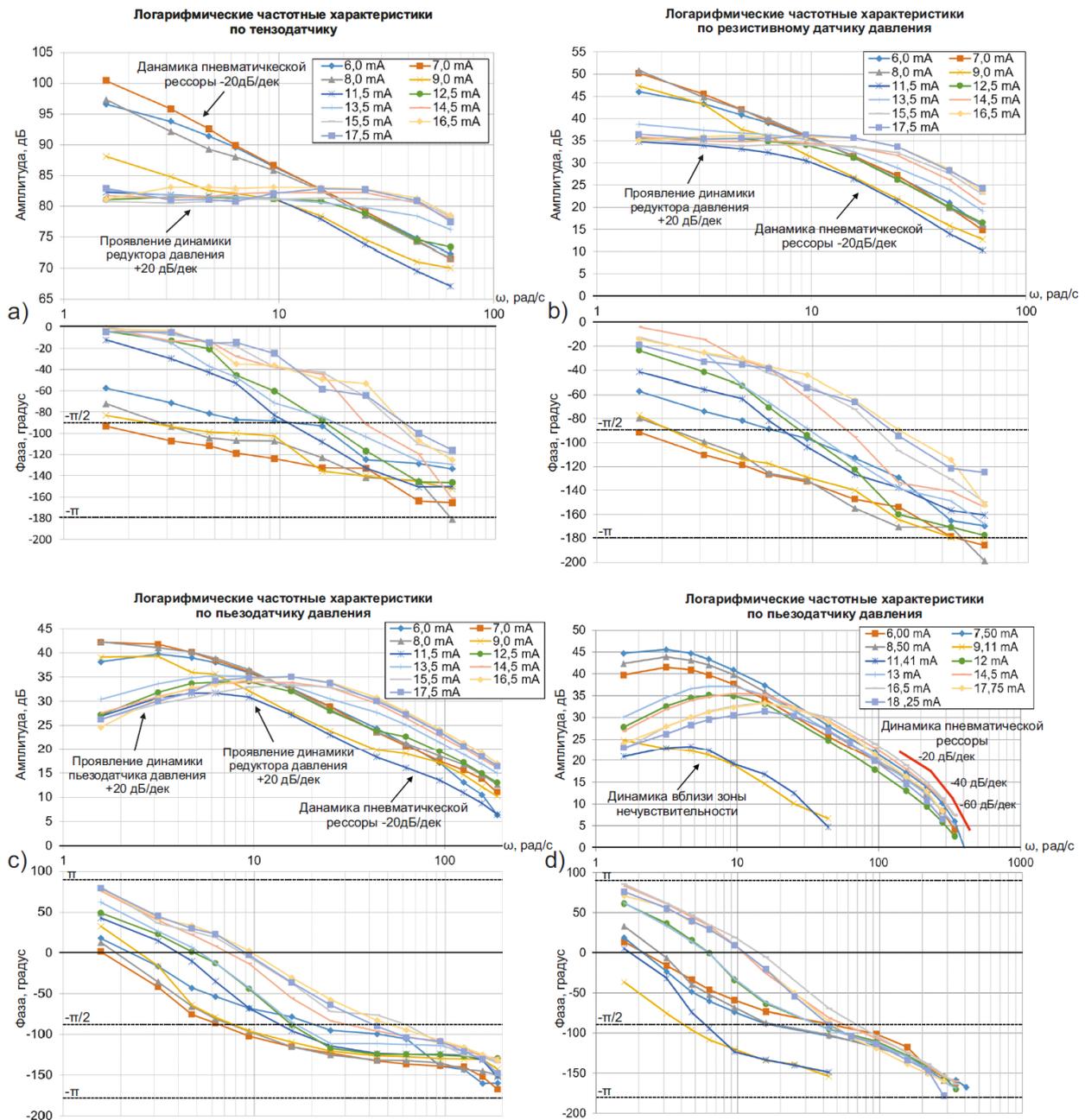


**Рис. 4.** Схемы идентификации. 1) – схема с использованием тензодатчика в качестве чувствительного элемента; 2) – схема с использованием резистивного датчика давления в качестве чувствительного элемента, 3) – схема с использованием пьезодатчика давления в качестве чувствительного элемента.

### 3. Результаты идентификации

#### 3.1. Логарифмические частотные характеристики

В результате обработки данных получены следующие четыре пары логарифмических частотных характеристик, показанных на рисунке 5. Как видно, из графиков под буквами а) и б) пневматическая рессора проявляет динамику интегратора со звеном чистого запаздывания. При этом использовались тензодатчик и резистивный датчик давления. Результаты получены в диапазоне частот от 0,25 до 10 Гц (1,5...63 рад/с). Для идентификации от 10 до 30 Гц используются данные с пьезодатчика давления, график под буквой с). Видно, что пьезодатчик совместно с редуктором давления искажают динамику системы на низких частотах (до 10 Гц). Тем не менее, в интересующем нас частотном диапазоне от 10 до 30 Гц влияние пьезодатчика и редуктора на динамику прекращается, и мы снова наблюдаем интегрирующие свойства пневматической рессоры. Однако, на ЛФЧХ видна тенденция к дальнейшему падению фазы, что не свойственно интегратору со звеном чистого запаздывания. Поэтому эксперимент проведен дополнительно в частотном диапазоне до 50 Гц для анализа причин падения фазы. Результат под буквой d) говорит о наличии как минимум двух передаточных функций первого порядка, с частотами среза от 35 Гц (220 рад/с).



**Рис. 5.** Логарифмические частотные характеристики. а) – с использованием тензодатчика; б) – и использованием резистивного датчика давления; в), д) – с использованием пьезодатчика давления.

### 3.2. Идентифицированная передаточная функция

Согласно логарифмическим частотным характеристикам до 30 Гц можно не рассматривать дальнейшее изменение динамики пневматической рессоры и принять ее вид как комбинацию двух звеньев: интегратора и звена чистого запаздывания. Однако на разных точках кусочно-линейной функции данные имеют небольшое расслоение, а следовательно параметры итоговой передаточной функции (1) зависят от режимов работы установки.

$$(1) \quad W(s) = \frac{k}{s} e^{-s\tau}.$$

## 4. Заключение

Таким образом, идентифицирован вид передаточной функции пневматической рессоры под действием управляющего воздействия в составе системы активной пневматической виброизоляции в диапазоне частот от 0,25 до 30 Гц по логарифмическим частотным характеристикам.

Показано, что полная динамика пневматической рессоры, как объекта управления, описывается набором параметров найденной передаточной функции, согласно режимам работы исполнительного механизма, в виде пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора.

Результаты дальнейших исследований позволят уточнить вид передаточной функции на частотах свыше 30 Гц, что сделает более предсказуемым процесс работы активной пневматической виброизоляции и внесет коррективы в проектирование регулятора для подобных систем.

## Список литературы

1. Филлипс Ч, Харбор. Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 616 с.
2. Xuping Zhang Review on the Development and Applications of Vibration Isolators // International Conference on Mechatronics and Automation. Tianjin: NDCEM, 2019. P. 2127-2131.
3. Pintado P., Ramiro C., Berg M., Morales A.L., Nieto A.J., Chicharro J.M., Miguel de Priego J.C., Garcia E. On the mechanical behavior of rubber springs for high speed rail vehicles // Journal of Vibration and Control. 2017. Vol. 1, No. 13. P. 1-13.
4. Pyung-hun Chang, Dong Ki Ham, Yun-ho Shin, Kwang-joon Kim Effective suppression of pneumatic vibration isolators by using input-output linearization and time delay control // Journal of Sound and Vibration. 2010. No. 329. P. 1636-1652.
5. Nieto A.J., Morales A.L., Trapero J.R., Chicharro J.M., Pintado P. An adaptive pneumatic suspension based on the estimation of the excitation frequency // Journal of Sound and Vibration. 2011. No. 330. P.1891-1903.
6. Медников В.А., Матюнин С.А. Элементы и устройства систем автоматического управления (первичные преобразователи, исполнительные органы). Самара: Самарский университет, 2012 93 с.
7. [https://catalog.camozzi.ru/pdf/series\\_lrwa.pdf](https://catalog.camozzi.ru/pdf/series_lrwa.pdf) (дата обращения 18.01.2024).