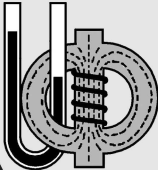


ISSN 2307-5457

*Primum
inter pares*

Материалы XXX Всероссийской
научно-практической конференции

„Учебный физический эксперимент:
Актуальные проблемы. Современные
решения“



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ОБРАЗОВАНИЯ

**УЧЕБНАЯ
ФИЗИКА**

Октябрь - декабрь 2025 №4

Издается с января 1997 года
Памяти В.В.Майера

СОДЕРЖАНИЕ

От редакции

О ПОСВЯЩЕНИИ ВЫПУСКОВ ЖУРНАЛА ПРОФЕССОРУ В. В. МАЙЕРУ3

Основная школа

В. В. Майер НАТУРНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
Е. И. Варакина СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ
А. В. Долженко ДЛЯ ФИЗИКО-БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТА4

Старшая школа

Е. А. Самойлов КОМПЛЕКС ФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ
В. Ю. Самойлова СТУДЕНТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ ВОСПИТАНИЮ
ШКОЛЬНИКОВ С ПРИЗНАКАМИ ОДАРЕННОСТИ20

Высшая школа

П. В. Казарин ЛЕКЦИОННАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРИНЦИПА
Н. Ф. Услугин ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ31
Е. И. Анисимов

С. В. Панькова ИЗУЧЕНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ
В. Г. Соловьёв КОЛЕБАНИЙ УПРУГОГО СТЕРЖНЯ
И. И. Толбухина В УНИВЕРСИТЕТСКОМ ФИЗИЧЕСКОМ ПРАКТИКУМЕ39
А. О. Юлина

Компьютер в эксперименте

В. Б. Пикулев МЕТОД ИК-СПЕКТРОСКОПИИ В УЧЕБНОМ
С. В. Логинова ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ50

Исследования

О. А. Яворук ПУТЕШЕСТВИЯ ПО ЛАБИРИНТАМ ЗНАНИЙ:
ОБОБЩЕННЫЕ ПЛАНЫ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ59

С. Г. Стоюхин СОЗДАНИЕ БИБЛИОТЕКИ АВТОРСКИХ ВИДЕОКЛИПОВ
И. Ю. Голубева ЛЕКЦИОННЫХ ДЕМОНСТРАЦИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
С. М. Кокин МЕТОДИКИ ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА ФИЗИКИ68

АВТОРЫ ЖУРНАЛА74

СТАТЬИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛЕ В 2025 ГОДУ75

Этот и последующие выпуски журнала посвящаются д.п.н., профессору Майеру Валерию Вильгельмовичу (Глазов), основателю журнала, главному редактору (1997–2025 гг.) и автору прекрасных статей.

Редакция журнала:

Е. И. Вараксина (главный редактор), Р. В. Акатов, Л. С. Кропачева, Р. В. Майер, Е. С. Мамаева

Редакционный совет:

С. В. Барышников	д.ф.-м.н., профессор, Благовещенск
И. В. Гребенев	д.п.н., профессор, Нижний Новгород
М. Д. Даммер	д.п.н., профессор, Челябинск
П. В. Зуев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
О. В. Лебедева	д.п.н., доцент, Нижний Новгород
Ю. А. Сауров	д.п.н., профессор, член-корр. РАО, Киров
А. П. Усольцев	д.п.н., профессор, Екатеринбург
А. А. Шаповалов	д.п.н., профессор, Барнаул

Оргкомитет конференции:

Н. Я. Молотков	д.п.н., профессор, Тамбов
Ф. А. Сидоренко	д.ф.-м.н., профессор, Екатеринбург
Я. А. Чиговская–Назарова	к.филол.н., доцент, ректор ГИПУ, Глазов
Т. Н. Шамало	д.п.н., профессор, Екатеринбург

Перечень ВАК: Журнал «Учебная физика» включен Высшей аттестационной комиссией (ВАК) Минобрнауки России в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук».

Адрес редакции, издателя и типографии: 427621, Удмуртия, Глазов, Первомайская, 25, ФГБОУ ВО «ГИПУ», Телефон: (341 41) 5–32–29.

E-mail: uch-fiz@mail.ru, kropach@bk.ru

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Глазовский государственный инженерно-педагогический университет имени В. Г. Короленко»

Журнал «Учебная физика» зарегистрирован Комитетом Российской Федерации по печати 4 февраля 1997 года, регистрационный № 015686; внесены изменения в запись о регистрации средства массовой информации Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) 2 мая 2017 года, ПИ № ФС77–69506.

Подписной индекс: 79876.

Использование и перепечатка материалов допускаются только по договоренности с редакцией журнала.

Сдано в набор 02.12.25. Подписано в печать 24.12.25.

Дата выхода в свет: 25.12.25.

Формат 60 × 90 1/16. Усл. печ. л. 4,75.

Заказ 172. Тираж 200 экз. Цена свободная.

Первая страница обложки: Современный вариант демонстрационного анализатора линейно поляризованного света (Майер В. В., Вараксина Е. И., Васильев И. А. Физические основы робототехники: совершенствование демонстрационного анализатора линейно поляризованного света // Учебная физика. — 2024. — № 4. — С. 31–50.)

Научная статья

ББК 74.262.23

УДК 372.853+53.05

П. В. Казарин, Н. Ф. Услугин, Е. И. Анисимов

ЛЕКЦИОННАЯ ДЕМОНСТРАЦИЯ ПРИНЦИПА ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ

Рассмотрена демонстрационная установка, реализующая систему динамического демпфирования. Дизайн и параметры установки подобраны таким образом, чтобы максимально подчеркнуть принцип действия и эффективность таких систем. Приведено краткое теоретическое объяснение демонстрируемых эффектов. От известных аналогов установка отличается простотой использования и высокой наглядностью. Установка предназначена для демонстрационных опытов на лекциях по физике в общеобразовательных школах и в учреждениях среднего и высшего профессионального образования. Также установка может быть использована в учебно-исследовательской работе учащихся.

Ключевые слова: колебательные системы, две степени свободы, динамическое демпфирование, демонстрационная установка.

P. V. Kazarin, N. F. Uslugin, E. Y. Anisimov

LECTURE DEMONSTRATION OF THE PRINCIPLE OF DYNAMIC DAMPING

A demonstration setup implementing a dynamic damping system is considered. In order to maximally emphasize the operating principle and efficiency of such systems, the design and parameters of the setup are adjusted. A brief theoretical explanation of the demonstrated effects is provided. The setup differs from known analogues in its ease of use and high visibility. The setup is intended for demonstration experiments in lectures on physics in secondary schools and institutions of secondary and higher professional education. The installation can also be used in the educational and research work of students.

Keywords: oscillatory systems, two degrees of independency, dynamic damping, demonstration setup.

DOI: 10.62957/2307-5457-2025-4-31-38

1. Введение

Колебательные процессы различной природы играют важную роль в технике, поэтому вполне естественно то внимание, которое уделяется этим вопросам в курсах общей физики. Обычно из-за недостатка времени преподаватели на лекциях ограничиваются более-менее подробным изучением колебательных систем только с одной степенью свободы. Системы же с двумя степенями свободы рассматриваются довольно поверхностно с тем расчетом, что более глубокое изучение этого вопроса при необходимости будет проведено в специальных курсах. При таком положении вещей оказывается очень важным и полезным хотя бы визуализировать эффекты, присущие системам с двумя степенями свободы.

Как правило, хороший эмоциональный и познавательный эффект на студентов оказывает демонстрация простейшей системы с двумя степенями свободы — двух одинаковых маятников со слабой связью. Перекачка энергии от одного маятника к другому и обратно, возбуждение разных мод в системах с двумя степенями свободы могут быть на этом примере продемонстрированы и объяснены на качественном уровне без привлечения строгого математического аппарата.

Другим, не менее ярким примером системы с двумя степенями свободы, может служить устройство, использующее для подавления вибраций динамическое демпфирование [1]. Сам принцип динамического демпфирования был впервые предложен Германом Фрамом (Hermann Frahm) в 1909 г. [2], и достаточно подробно рассмотрен в литературе, посвященной колебательным системам [1, 3].

Динамическое демпфирование колебаний — это процесс подавления нежелательных колебаний некой «главной» системы с помощью «вспомогательной» при условии, что главная система находится под воздействием переменной силы, изменяющейся с постоянной частотой.

Динамическое демпфирование достаточно широко применяется в различных областях техники. Например, разнообразные устройства такого рода используются в двигателестроении для снижения вибраций, вызванных движением поршней и коленчатого вала [4]. В судостроении для уменьшения качки корабля применяют цистерны Фрама и их аналоги [5]. При строительстве высотных зданий и сооружений для защиты от раскачивания, вызванного порывами ветра или сейсмическими толчками, в них могут устанавливаться так называемые инерционные гасители колебаний [6]. Такие гасители есть, например, в небоскребе «Тайбэй 101» в столице Тайваня и в «Монументе Победы» в Москве.

Моделирование работы таких устройств в учебной аудитории позволяет учащимся наглядно представить происходящие процессы, на конкретных примерах познакомиться с общими принципами, заложенными в работу систем динамического демпфирования. Хорошим примером такого учебного устройства может служить, например, колебательная система, содержащая в качестве упругих элементов две плоские, работающие на изгиб пружины [3, 7]. Одна пружина удерживает главное тело, другая (менее жесткая) — служит демпфером. Под действием периодической силы, частота которой близка к резонансной, главное тело начинает заметно колебаться. Меняя длину пружины-демпфера (т. е. изменяя жесткость и, следовательно, собственную частоту демпфера), учащиеся могут наблюдать изменение амплитуды колебаний главного тела вплоть до спадаания этой амплитуды до нуля.

Другая демонстрационная установка, реализующая систему динамического демпфирования, в течение нескольких лет используется на лекциях по общей физике в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского и неизменно вызывает интерес студентов. Ранее авторами был подготовлен краткий доклад об этой установке, представленный на XXX Всероссийской научно-практической конференции «Учебный физический эксперимент: Актуальные проблемы. Современные решения» [8]. В настоящей статье затронутые в докладе вопросы обсуждаются более подробно.

2. Демонстрационная установка

Фотография установки, реализующей принцип динамического демпфирования, приведена на рис. 1. Главная система представляет собой цилиндр массы $M = 0,3$ кг, а вспомогательная система — грузик массы $m = 0,05$ кг. Цилиндр подвешивается на пружине, верхний конец которой закреплен на эксцентрике. При его вращении создается периодическое силовое воздействие на цилиндр. Грузик крепится к нижней части цилиндра с помощью другой пружины. Жесткости пружин и массы тел подобраны так, что собственные частоты колебаний цилиндра и грузика оказываются достаточно близкими. Эксцентрик вращается коллекторным электромотором постоянного тока через редуктор. В описываемой установке использованы: первая пружина с жесткостью $k_1 = 44$ кг/с², вторая — с жесткостью $k_2 = 12,5$ кг/с² и электромотор типа R380-09320. Редуктор и мотор подбирались под требуемую частоту вращения эксцентрика (примерно 2,5 Гц). Частота вращения эксцентрика может регулироваться в небольших пределах изменением напряжения питания электромотора. При настройке установки частота вращения эксцентрика подбирается равной частоте колебаний грузика. Два закрепленных на раме установки стержня, проходящие через

прикрепленные к цилиндру кольца, играют роль направляющих, позволяя цилиндру совершать только вертикальные колебания.



Рис. 1. Установка для демонстрации динамического демпфирования

Как правило, демонстрация эффекта динамического демпфирования на лекции проводится в следующей последовательности: сначала, удерживая в руках грузик так, что пружина, на которой он подвешен, остается не натянутой, включают электродвигатель — цилиндр начинает колебаться с амплитудой порядка 5–8 см (рис. 2.1). Затем отпускают грузик. Грузик начинает колебаться. Амплитуда этих колебаний устанавливается в течение нескольких периодов, после чего сам цилиндр практически перестает двигаться (рис. 2.2). Ловим рукой грузик — опять начинает колебаться цилиндр.

По сравнению с известными аналогами [3, 7] данная установка имеет некоторые преимущества. В частности, должным образом настроенная установка не требует сложных манипуляций во время проведения демонстрационного опыта, а сам опыт занимает не больше минуты. Благодаря размерам компонентов установки опыт может проводиться в больших (вмещающих до 200 человек) ауди-

ториях. При описании и обсуждении опыта с учащимися конструкция установки позволяет использовать простейшую теоретическую модель без дополнительных объяснений. С другой стороны, данная установка менее приспособлена для выполнения учащимися лабораторных и учебно-исследовательских работ и в этом отношении уступает установке, описанной в работе [7].

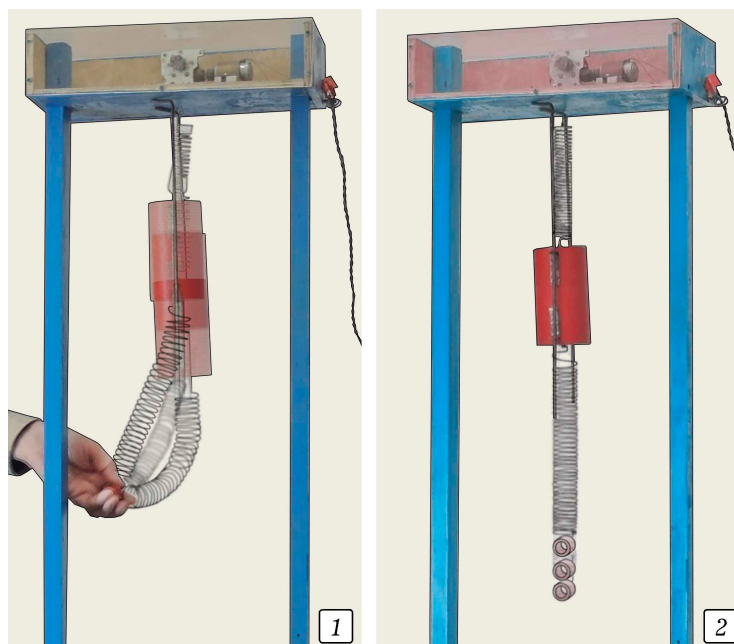


Рис. 2. Демонстрация динамического демпфирования: 1 — грузик-демпфер удерживают рукой, цилиндр («главная» масса) совершает колебания с большой амплитудой; 2 — грузик отпущен, его колебания установились, цилиндр почти неподвижен. Оба изображения получены путем наложения трех кадров, примерно соответствующих среднему и двум крайним положениям колеблющихся тел

3. Теоретическое пояснение

Чтобы в общих чертах прояснить принципы динамического демпфирования, рассмотрим простую модель (рис. 3). Роль главной системы играет груз массой m_1 , подвешенный на пружине жесткостью k_1 , верхний конец которой (точка C) может совершать вертикальные колебания. К первому грузу на пружине жесткостью k_2 подвешен демпфер — груз массой m_2 . Массами пружин и диссипативными процессами пренебрежем [1].

В положении равновесия действующие на грузы силы тяжести и силы упругости пружин уравниваются друг друга. Если точка подвеса C по каким-то внешним причинам будет двигаться, то вся система придет в движение, и тогда 2-й закон Ньютона для двух грузов можно записать так:

$$\begin{cases} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = -k_1(x_1 - x_C) + k_2(x_2 - x_1), \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -k_2(x_2 - x_1), \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 , x_2 и x_C — смещения от равновесных положений вниз двух грузов и точки C соответственно.

Пусть точка C колеблется по гармоническому закону:

$$x_C(t) = B \cos \omega t. \quad (2)$$

Тогда гармоническими будут и вынужденные колебания грузов, и мы сможем для системы уравнений (1) искать решение в виде:

$$\begin{cases} x_1(t) = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \\ x_2(t) = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2). \end{cases} \quad (3)$$

Подстановка зависимостей (3) в систему (1) превратит в итоге дифференциальные уравнения в алгебраические, решая которые, можно найти амплитуды колебаний грузов:

$$\begin{cases} A_1 = \left| \frac{\omega_1^2(\omega_2^2 - \omega^2)}{\alpha\omega_2^2\omega^2 - (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)} \right| B, \\ A_2 = \frac{\omega_1^2\omega_2^2}{|\alpha\omega_2^2\omega^2 - (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)|} B. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь использованы следующие обозначения:

$$\omega_1^2 = \frac{k_1}{m_1}, \quad \omega_2^2 = \frac{k_2}{m_2}, \quad \alpha = \frac{m_2}{m_1}. \quad (5)$$

Фазы колебаний грузов, если частота ω колебаний точки подвеса

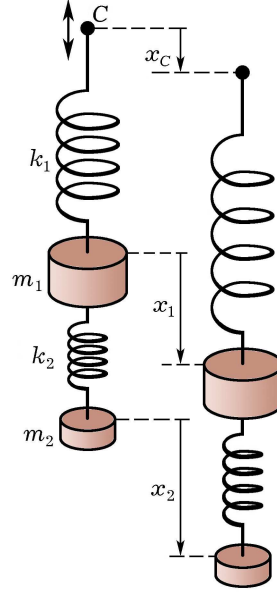


Рис. 3. Теоретическая модель для объяснения динамического демпфирования

C не слишком сильно отличается от ω_2 , получаются такими:

$$\begin{cases} \varphi_1 = 0, \text{ если } \omega < \omega_2, \\ \varphi_1 = \pi, \text{ если } \omega > \omega_2, \end{cases} \quad \varphi_2 = \pi. \quad (6)$$

Обратим внимание на важный для нас факт — амплитуда колебаний A_1 главного груза будет равна нулю, когда $\omega = \omega_2$, то есть когда частота внешнего воздействия равна частоте собственных колебаний демпфера. При этом оказывается, что $\varphi_2 = \pi$ — демпфер колеблется в противофазе с возмущающей силой, и упругая сила его пружины, действующая на главное тело, во всякий момент времени будет равна по величине и противоположно направлена возмущающей силе. Таким образом, эти две силы будут компенсировать друг друга, и главный груз останется неподвижным.

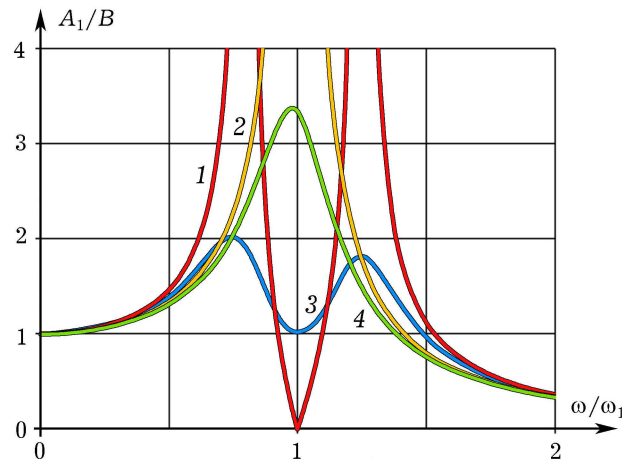


Рис. 4. Зависимость $A_1(\omega)$ амплитуды колебаний главной системы от частоты внешнего воздействия. По оси ординат отложено отношение амплитуды A_1 к амплитуде B колебаний точки подвеса C . По оси абсцисс — отношение частоты ω внешнего воздействия к частоте ω_1 собственных колебаний главной системы. График 1 (красный) — система с демпфером, затухание отсутствует; график 2 (желтый) — система без демпфера, затухание отсутствует; график 3 (синий) — система с демпфером, при наличии затухания; график 4 (зеленый) — система без демпфера, при наличии затухания

Полученная зависимость $A_1(\omega)$ отображена на графике 1 (рис. 4). Для сравнения на том же рисунке приведена зависимость амплитуды колебаний главной системы в отсутствие демпфирования (график 2). При наличии в системе затухания вывод зависимости $A_1(\omega)$ заметно усложняется, поэтому ограничимся представлением соответствующих графиков, также показанных на рис. 4 (с демпфиро-

ванием — график 3, без демпфирования — график 4). Графики построены для случая, когда $\omega_2 = \omega_1$. Как можно видеть, в системе без затухания, если нет демпфирования (график 2), амплитуда A_1 должна неограниченно возрастать при приближении частоты ω к резонансу, а при наличии демпфирования (график 1) наоборот стремиться к нулю. В системе с затуханием амплитуда колебаний главного груза под действием демпфера (график 3) не спадает до нуля, но все равно оказывается значительно меньше, чем без демпфера (график 4).

4. Заключение

На наш взгляд, данная демонстрация может быть полезна студентам вузов и школьникам старших классов, поскольку, во-первых, знакомит их с одним из эффектов, реализующихся в системах с двумя степенями свободы, во-вторых, дает представление о широко используемом в технике принципе динамического демпфирования. И, в-третьих, сам этот принцип можно достаточно ясно объяснить на доступном для школьников и студентов уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ден-Гартог Дж. П. Механические колебания: Перевод с четвертого американского издания А. Н. Обморшега. — М.: Наука, 1960. — 674 с.
2. Frahm H., Device for Damping Vibration of Bodies, U.S. Patent 989958, 1911.
3. Малов Н. Н. Основы теории колебаний. Пособие для учителей. — М.: Просвещение, 1971. — 198 с.
4. Покусаев М. Н., Сибярев К. О., Горбачев М. М., Ибадуллаев А. Д. Методика выбора пружинного демпфера крутильных колебаний судового дизеля // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2022. — № 4(53). — С. 75–84.
5. Чижиумов С. Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие. — Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. — 110 с.
6. Поляков В. С., Килимник Л. Ш., Черкашин А. В. Современные методы сейсмозащиты зданий. — М.: Стройиздат, 1989. — 320 с.
7. Майер В. В. Резонансное демпфирование колебаний // Учебная физика. — 2003. — № 6. — С. 33–38.
8. Казарин П. В., Услугин Н. Ф., Анисимов Е. И. Устройство для демонстрации принципа динамического демпфирования // Проблемы учебного физического эксперимента: Сборник научных трудов. Выпуск 42. — М.: ИСРО РАО, 2025. — С. 63–65.

Национальный исследовательский
Нижегородский государственный
университет им. Н. И. Лобачевского

Поступила в редакцию 30.04.25.