

**ПРОЯВЛЕНИЕ  
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ.  
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ  
И РАБОТЫ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ**



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

**ПРОЯВЛЕНИЕ  
АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ.  
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И РАБОТЫ  
ШАРИКОПОДШИПНИКОВ**

Учебное пособие

Томск  
Издательство ТГАСУ  
2020

*Авторы: В.А. Литвинова, С.В. Мелентьев, А.А. Клопотов,  
Н.М. Кондратьева*

УДК 621.822:534.1(075.8)  
ББК 34.445.32я73+34.412я73  
П849

**П849 Проявление автоколебательных процессов. Особенности строения и работы шарикоподшипников** : учебное пособие / В.А. Литвинова, С.В. Мелентьев, А.А. Клопотов, Н.М. Кондратьева. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. – 94 с. – Текст : непосредственный.  
ISBN 978-5-93057-953-6

В учебном пособии рассмотрены основы теории колебаний с учетом сил сухого трения. Приведено описание колебательных процессов на примерах простых механических систем. Показаны особенности математического описания колебательных процессов. Использование основных представлений колебательных процессов в условиях сухого трения является составной частью дисциплины «Основы триботехники». Кроме того, дано описание проявлений вибрации и особенностей устройства подшипников качения. Эти данные относятся к дисциплинам «Детали машин и механизмов» и «Теории машин и механизмов».

Учебное пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения на механико-технологическом факультете.

УДК 621.822:534.1(075.8)  
ББК 34.445.32я73+34.412я73

**Рецензенты:**

**Ю.А. Абзаев**, докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Высшая математика» ТГАСУ;

**Ю.В. Иванов**, докт. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Наноматериалы и нанотехнологии» НИ ТПУ.

ISBN 978-5-93057-953-6 © Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2020  
© Литвинова В.А., Мелентьев С.В., Клопотов А.А., Кондратьева Н.М., 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Содружество математики, физики и техники очень ярко проявилось как в создании различных конструкций и различных технических устройств, так и в разработке основ математического аппарата теории колебаний. Например, решение задачи о колебаниях линейных дискретных систем не возможно без использования основ высшей алгебры о квадратичных формах. Здесь необходимо отметить, что теория дифференциальных уравнений в частных производных и некоторые вопросы интегральных уравнений имеют чисто физическую основу, связанную с колебаниями.

В теории колебаний хорошо развит подход, основанный на упрощенной математической трактовке. В результате приходят к *линейным* дифференциальным уравнениям. Однако есть явления, которые в теории колебаний невозможно решить только при помощи *линейных* дифференциальных уравнений. Поэтому необходимо иметь представления о нелинейных задачах.

Перечислим основные вопросы, которые будут освещены в настоящем учебном пособии.

1. Основные понятия и терминология теории колебаний (специфические термины, как, например, частота, циклическая частота, логарифмический декремент и т. п.).
2. Конструктивные особенности подшипников.
3. Особенности учета диагностики подшипников на основе теории колебаний.

## 1. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ

Автоколебательные процессы проявляют себя во многих явлениях, и как следствие, они находят применение в технике. В качестве наглядных примеров можно привести разные системы и устройства: генераторы электромагнитного излучения, лазеры, духовые и смычковые инструменты и др. В то же время автоколебания могут приводить к негативным явлениям. Например, разрушение подвесных мостов из-за крутильных автоколебаний, возникших под действием ветровых нагрузок. В этом аспекте, наглядно иллюстрирующем разрушающее действие автоколебательных процессов, показательной является катастрофа, связанная с обрушением висячего моста через реку Такома (США) пролетом 854 м в 1940 г. (рис. 1).



*Рис. 1.* Разрушение Такомаского моста

Ветер дул со скоростью 18,8 м/с, и в какой-то момент пролёт моста внезапно стал совершать крутильные колебания. В результате динамические колебания моста в течение 45 мин привели к его разрушению. По словам очевидцев, наблюдались обычные S-образные колебания, которые внезапно перешли в сильные скручивающие колебания: «мост как бы нырял, как корабль в бурю». Каждое колебание приводило к появлению нового и способствовало развитию более сильного колебания. Это продолжалось до тех пор, пока не произошел разрыв тросов в кабеле, что привело к обрушению всего пролета.

На основе знания физических законов и особенностей процессов, происходящих при автоколебаниях, а также анализа других катастроф, связанных с раскачиваниями и колебаниями висячих мостов, была решена задача по их надежной эксплуатации. Для предотвращения этой проблемы в конструкцию висячих мостов были введены жесткие балки.

Другое явление, которое связано с отрицательным действием автоколебательных процессов, приводит к «флаттеру», вызывающему опасные колебания крыльев самолетов (рис. 2).

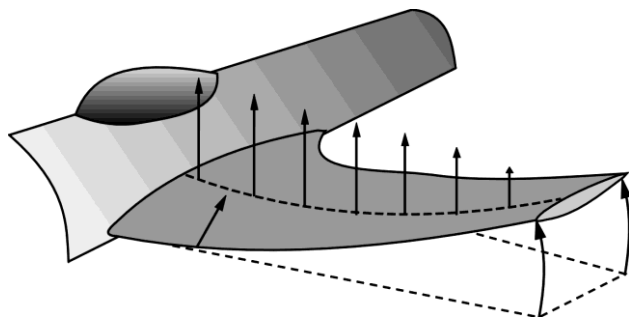
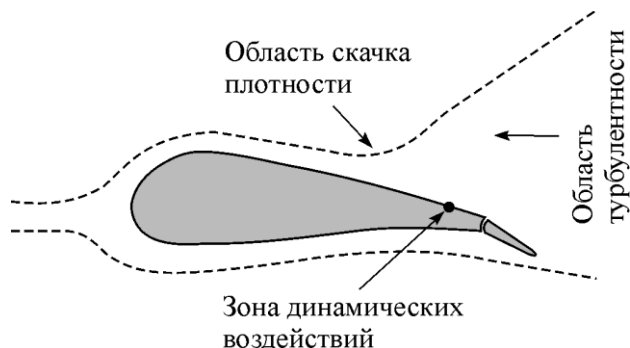


Рис. 2. Амплитуда колебаний крыла

Появление флаттера обусловлено взаимодействием самолета и набегающим потоком воздуха, который является источником энергии. Величина обратной связи в этом процессе обу-

словлена упругими свойствами самолета и, согласно теории колебаний, позволяет описывать это явление как автоколебательное. На околосвуковых скоростях на крыльях самолёта могут формироваться скачки уплотнения, как это показано на рис. 3.



*Рис. 3.* Схематическое представление потока воздуха (штриховая линия), обтекающего верхнюю поверхность крыла, которое резко замедляется и отрывается от крыла. За точкой отрыва происходит скачок плотности и это приводит к воздействию на крыло и его деформации. Положение точки, где происходит скачок плотности, и деформация крыла взаимно влияют друг на друга, и это создает условия для возникновения незатухающих колебаний

Более углубленно принцип действия автоколебательных колебаний и роль фрикционных колебаний в них очень удобно проследить на примере изучения колебаний маятника Фроуда. Способность маятника Фроуда генерировать автоколебания, как правило, объясняется наличием отрицательного участка в характеристике трения между муфтой маятника и вращающимся подвесом. Физика автоколебательных явлений, которые наглядно проявляются в простых механических системах, будет более подробно описана ниже.

## 2. КОЛЕБАНИЯ В АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЕ (ГАРМОНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛЯТОР)

В рамках классической механики закон движения простейшей автономной колебательной системы может быть представлен в виде

$$a + \omega_0^2 x = 0, \quad (1)$$

где  $a$  ( $a = \ddot{x}$ ) – ускорение, с которым движется колеблющееся тело в системе;  $x$  – величина смещения тела из положения равновесия;  $\omega_0$  – собственная циклическая частота колебаний системы.

Описание и анализ свойств колебательных систем (и не только автономных) удобно проводить с помощью дифференциальных уравнений. В данном случае движение простейшей автономной колебательной системы описывается линейным дифференциальным уравнением вида

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (2)$$

Эту систему в физике называют *гармоническим осциллятором*. При определенных упрощающих предположениях в качестве примера такой системы можно использовать следующее устройство. Это устройство состоит из тела массой  $m$ , двух пружин и стержня, на который они нанизаны (рис. 4).

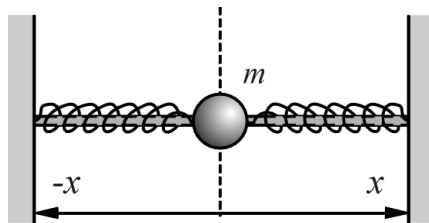


Рис. 4. Схема устройства, создающего горизонтальные гармонические колебания упруго закрепленного груза массой  $m$ , находящегося на стержне



В этом устройстве, как показано на рис. 4, тело может совершать горизонтальные движения вдоль стержня под действием двух пружин. Отклонение тела от положения равновесия и от времени графически представлено на рис. 5.

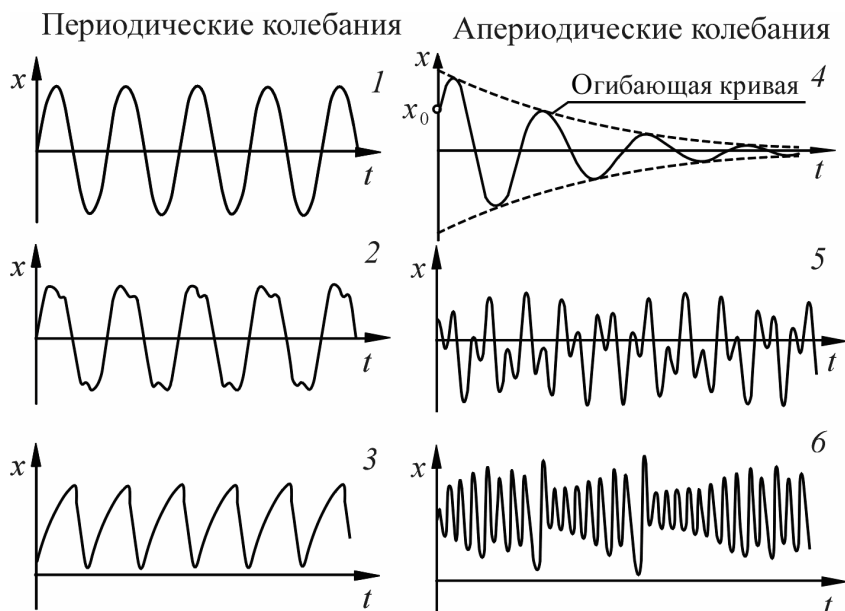


Рис. 5. Графики гармонических и негармонических колебаний:

1 – гармонические (синусоидальные); 2 – ангармонические; 3 – ангармонические релаксационные; 4 – затухающие; 5 – квазипериодические; 6 – хаотические

Приведем эти упрощающие условия. Первое – силы, с которыми действуют пружины на тело, подчиняются закону Гука. То есть силы, действующие на тело, пропорциональны его смещению  $x$  относительно положения равновесия. Второе – в системе при движении не действуют силы, т.е. нет трения ни о воздух, ни о поддерживающий стержень. Кроме того, сами пружины не обладают внутренним трением. Очевидно, что эти предположения в реальных условиях не работают, но позволяют наглядно вы-

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	3
1. Общие закономерности теории колебаний .....	4
2. Колебания в автономной системе (гармонический осциллятор) .....	7
3. Колебания системы при наличии сил трения .....	11
4. Затухающие колебания как осцилляторный процесс.....	13
5. Автоколебания и фрикционные колебания.....	17
6. Примеры проявления автоколебаний в механических системах .....	19
7. Биения. Сложение колебаний с близкими частотами, происходящими вдоль одной прямой.....	33
8. Спектральное разложение.....	36
9. Подшипники качения и вибрация .....	39
9.1. Общие положения.....	39
9.2. Назначение, типы, область применения, разновидности конструкций подшипников качения.....	39
9.3. Методы диагностики подшипников .....	42
9.4. Особенности диагностики подшипников.....	45
10. Основные критерии работоспособности и расчета подшипников качения .....	49
11. Биения подшипников .....	53
12. Расчет подшипников качения по динамической грузоподъемности.....	60
13. Расчет подшипников качения.....	75
13.1. Расчет подшипников по статической грузоподъемности.....	75
13.2. Особенности расчета подшипников качения при нестационарных режимах нагружения.....	75
14. Примеры решения задач .....	77
Вопросы и задания для самопроверки.....	86
Заключение.....	88
Список рекомендуемой литературы .....	90
	93

*Учебное издание*

*Литвинова Виктория Александровна  
Мелентьев Сергей Владимирович  
Клопотов Анатолий Анатольевич  
Кондратьева Нина Михайловна*

**ПРОЯВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ.  
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И РАБОТЫ  
ШАРИКОПОДШИПНИКОВ**

Редактор Е.А. Кулешова  
Технический редактор Н.В. Удлер

Подписано в печать 25.12.2020.  
Формат 60×84/16. Бумага офсет. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 4,95.  
Тираж 150 экз. Первый завод 52 экз. Зак. № 132.

Изд-во ТГАСУ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.  
Отпечатано с оригинал-макета в ООП ТГАСУ.  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.