

ОТ ТЕОРИИ КОЛЕБАНИЙ - К НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ.

© 2013 г. М. И. Мотова, В.Д. Шалфеев

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

motova@rf.unn.ru

АННОТАЦИЯ. В статье дан ретроспективный взгляд на университетский курс лекций по теории колебаний и его эволюции за семидесятилетний период на примере лекций, читавшихся для студентов - радиофизиков в Нижегородском университете.

Ключевые слова: курс лекций по теории колебаний, нелинейные колебания, нелинейная динамика.

Роль теории колебаний в различных ее обликах – нелинейных колебаний, нелинейной физики, нелинейных волн, нелинейной динамики, теории динамических систем, качественной теории дифференциальных уравнений, синергетики – и сейчас огромна. Теория колебаний – наука об общих закономерностях эволюционных процессов различной природы: физической, химической, биологической, экономической, социальной... . Изучаемая ею математическая модель – динамическая система – стала основной математической моделью точной науки.

Ю.И. Неймарк

"Личность в науке. А.А. Андронов"
изд. ННГУ, Н.Новгород, 2001

Вопрос о том, чему учить и как учить, во все времена относился к числу наиболее актуальных, наиболее проблемных и наиболее обсуждаемых как среди тех, кто учит, так и среди тех, кто учится. В полной мере это относится и к современному университетскому образованию. Общее направление подготовки по любой специальности в основном определяется набором общеспециальных дисциплин, а конкретная подготовка (специализация) - набором спецкурсов. Наборы спецкурсов и их содержание, как правило, периодически обновляются в соответствии с изменяющимися запросами отраслей – потребителей выпускников по данной специальности. Что касается общеспециальных дисциплин, то и набор курсов и их содержание, несомненно, обладают определенной степенью консервативности и изменяются существенно медленнее, поскольку именно они определяют «лицо» специальности (а «лицо», хотя и подвержено некоторым изменениям, тем не менее, должно оставаться узнаваемым).

Очевидно, что решение задач оптимизации управления образовательными процессами, требует понимания закономерностей развития тех или иных специальностей, что, в свою очередь, определяет актуальность изучения основных тенденций эволюционного развития общеспециальных дисциплин, составляющих основу специальности. В общем случае задача представляется трудноразрешимой, поскольку для различных специальностей существует множество различных факторов (как объективного, так и субъективного характера), влияющих на их развитие. Однако, даже упрощенный вариант рассмотрения отдельного, частного случая развития конкретной дисциплины для конкретной специальности, несомненно, может представлять интерес. Принимая во внимание это обстоятельство, авторы выбрали для дальнейшего рассмотрения типичный общеспециальный курс лекций по теории колебаний (специальность - радиоп физика).

В 1945 году в Горьковском (Нижегородском) университете в ответ на запросы промышленности в специалистах по СВЧ-электронике, радиолокации, радиосвязи был создан первый в нашей стране радиоп физический факультет и открыта подготовка по новой специальности - радиоп физике. Фундаментом радиоп физики, как науки, являются электроника, электродинамика и теория колебаний (см. Физический энциклопедический словарь [1]) Естественно, что в цикле общеспециальных дисциплин по этой специальности, наряду с другими, присутствует дисциплина - теория колебаний.

В этой статье¹ авторы попытались представить ретроспективный анализ содержания курса лекций по теории колебаний, читавшегося в Горьковском (Нижегородском) университете на протяжении около 70 лет различными лекторами и рассмотреть особенности его эволюционной динамики.

По-видимому, первый лекционный курс по теории колебаний, систематически излагавший физику колебательно – волновых процессов и методы их исследования, читался Л.И.Мандельштамом для студентов – физиков МГУ. До этого в учебном плане высшей школы теории колебаний, как отдельного курса, не существовало.

Записи этого курса, близкие к стенограмме, в 1930-1932 годах была сделана А.А. Андроновым. Им же был прочитан ряд лекций в этом курсе по плану Л.И. Мандельштама (например, лекции 11, 17, 18, 23), конспект в это время вел М.А. Дивильковский.

¹ Статья написана по материалам лекции, прочитанной на 10-й Международной школе-конференции «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2013) 7-12 октября 2013 г.

С использованием записей А.А. Андропова курс лекций Л.И. Мандельштама был опубликован в 1972 году в виде книги [2]. Главная особенность этого курса состояла в том, что здесь впервые предметом изучения стали не свойства отдельных колебательных систем разной физической природы, а общие свойства колебательно-волновых процессов и систем, независимо от их физической природы. Объем курса - 32 лекции.

В лекциях рассматриваются линейные колебания сосредоточенных систем: математическое описание колебательных процессов, сложение линейных колебаний, вынужденные колебания, резонанс, параметрический резонанс. И хотя основное внимание сосредоточено на линейных системах, имеется несколько лекций, содержащих своеобразное краткое введение в теорию нелинейных колебаний (фазовая плоскость консервативных систем, ламповый генератор), а во второй части лекций рассматриваются и колебания в распределенных системах.

В 1931 году А.А. Андронов переезжает из Москвы в Горький, где с 1933 года заведует кафедрой теоретической физики и физики колебаний физико-математического факультета ГГУ. Здесь А.А. Андронов читает курс лекций по теории колебаний для студентов-физиков.

Заметим, что в этот период времени А.А. Андронов с соавторами готовит рукопись будущей книги «Теория колебаний» [3]. Сохранились лекции Андропова, запись которых сделана сотрудником кафедры Н.И. Ашбелем в 1934-1936 годах.

Курс разбит на три части: первая (20 лекций) для студентов 3 курса, вторая (52 лекций) для студентов 4 курса, третья (43 лекции) для студентов 5 курса. Общий объем 115 лекции.

В приложении представлен полекционный план курса, прочитанного А.А. Андроновым, по записям сделанными студентом тех лет, а затем сотрудником кафедры Н.И. Ашбелем.

В первой части этого курса лекций в основном излагается теория линейных колебаний с большим числом примеров из области электротехники (теория переменных токов, трансформатор, мост Уинстона и др.), радиотехники (модуляция, прием-передача, спектры и др.) и других областей (теория атома, теория атмосферных помех и др.). Во второй части излагается теория нелинейных колебаний сосредоточенных систем. Здесь в основном изложение соответствует книге «Теория колебаний» [3], однако есть разделы, не вошедшие в книгу, например, несколько лекций посвящено теории захватывания (синхронизации). Наконец, третья часть содержит теорию колебаний распределенных систем. Интересно отметить, что в первой и второй частях

наряду с использованием аналитических и асимптотических методов (что характерно для курса Л.И. Мандельштама) очень широко используются качественные методы теории дифференциальных уравнений и теории бифуркаций. По существу во второй части изложена теория нелинейных колебаний на плоскости, называемая сейчас классической теорией нелинейных колебаний.

В 1945 году при организации радиофизического факультета и создании на новом факультете кафедры теории колебаний (зав. кафедрой стал А.А. Андронов) этот курс становится основным профильным кафедральным курсом. В этот период курс несколько сократился за счет изъятия из него разделов, непосредственно относящихся к профилю других кафедр, созданных на радиофизическом факультете – электроники, радиотехники, электродинамики, распространения радиоволн.

Рассматривая курс А.А. Андронova в целом, следует отметить, что для него, несомненно, характерна преемственность с курсом Л.И. Мандельштама, поскольку в этом курсе, так же как и в курсе Л.И. Мандельштама, излагается физика колебательно-волновых процессов и систем. Судя по содержанию, А.А. Андронов, как и Л.И. Мандельштам, рассматривал теорию колебаний (физику колебаний) как часть теоретической физики. В этой связи интересно отметить, что кафедра, которой заведовал А.А. Андронов на физико-математическом факультете ГГУ, имела название кафедры «Теоретической физики и физики колебаний». По сравнению с курсом Л.И. Мандельштама, А.А. Андронов существенно расширил объем курса. Расширен раздел, касающийся теории линейных колебаний, в частности за счет большого числа примеров, из актуальных для того времени приложений в электро - и радиотехнике. Существенно расширена, хотя и осталась в рамках линейной, часть курса по колебаниям в распределенных системах, в частности за счет примеров. Наконец, в курсе А.А. Андронova представлена практически полностью новая, отсутствовавшая в курсе Л.И. Мандельштама, очень объемная часть теории нелинейных колебаний, включающая как качественные методы исследования нелинейных систем на плоскости, так и большое число примеров исследования конкретных нелинейных систем.

В курсе лекций, прочитанном А.А. Андроновым, в последующие годы, конечно, происходили изменения, по требованиям того времени.

С 1953 года заведующим кафедрой теории колебаний становится Н.А. Железцов, ученик А.А. Андронova. Именно он читает в 50 годах курс лекций по теории колебаний (при этом он читал часть лекций еще в курсе Андронova). В этот период Н.А. Железцов, вместе с Е.А. Леонтович-Андроновой работает над вторым, переработанным и дополненным изданием книги «Теория колебаний» [4]. По

сравнению с курсом А.А. Андропова, в курсе лекций Н.А. Железцова произошло существенное сокращение общего объема (осталось примерно 60 лекций). Несколько сокращена часть, посвященная линейным колебаниям (за счет физических примеров) и полностью изъята часть, связанная с распределенными системами. Зато, занимающий центральное место в курсе раздел по теории нелинейных колебаний, существенно расширен как за счет изложения новых методов, интенсивно развивавшихся в 50-е годы (метод Д-разбиений, метод малого параметра при старшей производной, метод точечных отображений, методы качественной теории дифференциальных уравнений и теории бифуркаций), так и за счет включения большого числа примеров по исследованию устойчивости, исследованию предельных циклов и т.д. Кроме этого в курсе довольно большой объем отведен изложению основ теории систем автоматического регулирования, следящих систем, в частности, исследованию устойчивости таких систем, условий возбуждения автоколебаний в зависимости от используемых параметров.

Обсуждая в целом изменения, введенные Н.А. Железцовым, можно сделать вывод, что позиции курса теории колебаний на радиофизическом факультете, как курса по физике колебательно-волновых процессов и систем (каким трактовали его Л.И. Мандельштам и А.А. Андронов), в курсе Н.А. Железцова ослабились из-за резкого уменьшения числа физических примеров и полного изъятия раздела по колебаниям распределенных систем. Однако наряду с этим произошло и значительное расширение разделов, связанных с новыми методами теории нелинейных колебаний и новыми приложениями теории колебаний для изучения систем автоматического регулирования. Это объясняется тем, что на кафедре в этот период активно велись работы по исследованию систем автоматического регулирования, начатые еще при А.А. Андронове, а также работы по созданию одной из первых в СССР цифровых вычислительных машин – «машины ГИФТИ» [5] (именно А.А. Андронов в начале 50-х годов обратил внимание на перспективность этих работ). Поэтому, включение Н.А. Железцовым в курс теории колебаний разделов по динамике систем автоматического регулирования и по динамике таких схем, как мультивибратор, киппре, триггер (основной элемент ЭВМ), представляется достаточно оправданным для того времени.

Наряду с этим, интересно отметить, что в этот период времени значительно обострился интерес к поиску и анализу предельных циклов в системах разной природы, не только физических, но и биологических, химических и т.д. (Своеобразная «охота на предельные циклы» была объявлена еще А.А. Андроновым [6]). Таким

образом, к 60-м годам становится заметным, что теория колебаний может трактоваться не только как физика колебательно – волновых процессов и систем, но и иметь более широкую трактовку как нелинейная динамика колебательно- волновых систем любой природы - физических, биологических, химических, социально-экономических и т.п. К 90-м годам тенденция к этим изменениям значительно укрепились и фактически получила признание во всем мире [7]. В этом убеждают огромное число приходящихся на этот период конференций, книг, статей по нелинейной динамике биологических систем, социально-экономических систем, нейродинамике и др.

В середине 60-х годов курс теории колебаний начинает читать М.И. Рабинович, ученик А.В. Гапонова-Грехова. В этот период в Горьком под общим руководством А.В. Гапонова-Грехова интенсивно развиваются исследования по теории нелинейных волн (ударные волны, стационарные волны, теория солитонов и др.). Активно развивается и теория многомерных динамических систем, в частности, теория динамического хаоса (Ю.И. Неймарк, Л.П. Шильников, М.И. Рабинович).

М.И. Рабинович предпринимает попытку осуществить достаточно смелое изменение курса теории колебаний для студентов - радиофизиков, имеющее целью восстановить традиции чтения курса теории колебаний как курса по физике колебательно – волновых процессов и систем, заложенные Л.И.Мандельштамом и А.А. Андроновым. Для этого, понимая, что увеличение числа часов по лекциям практически невозможно, М.И. Рабинович предлагает новую концепцию чтения курса лекций по теории колебаний, предполагающую не последовательное, как было ранее при Л.И. Мандельштаме и А.А. Андронове, а параллельное изложение теории колебаний сосредоточенных систем и теории колебаний распределенных систем (теории нелинейных волн). Он разрабатывает новую рабочую программу курса и начинает читать по ней курс лекций. Несколько позднее М.И. Рабинович, вместе с Д.И. Трубецковым выпускают книгу по теории колебаний и волн, реализующую концепцию параллельного изложения теории колебаний и волн в едином курсе [8]. Примерно в это же время к этому курсу сотрудниками кафедры теории колебаний ГГУ (ННГУ) выпускается сборник задач под ред. Л.В. Постникова и В.И. Королева [9]. Подготовка книги [8] заняло достаточно продолжительное время, а первоначально запись курса была сделана в 1972-1973 годах сотрудниками кафедры М.И. Мотовой и Т.М. Тарантович, а в 1978 году курс был издан в виде учебного пособия [10]. Общий объем примерно 50 лекций. В курсе М.И. Рабиновича появились новые разделы по конкуренции, синхронизации, анализу многомерных систем (состояния равновесия систем 3 порядка, динамический хаос, бифуркации перехода к хаосу, генератор хаоса и

др.). И, естественно, появились новые разделы по распределенным системам (теории нелинейных волн) с большим количеством примеров.

Рассматриваемые здесь программы курсов лекций по теории колебаний, читавшихся с временными интервалами порядка 15-20 лет, охватывают период около 70 лет. Естественно, что за такой период времени, прошло несколько поколений студентов и преподавателей, появились заново или утратили свою актуальность отдельные разделы науки, развились новые методы исследования, возникли новые приложения. Все это, в той или иной степени, влияло на содержание курса. Кроме того, следует принять во внимание, что за этот период времени неоднократно происходили упорядочения типовых учебных планов и программ, как правило, приводившие к сокращению лекционного объема, что также вело к некоторым изменениям в содержании курса. Какие выводы можно сделать из проведенного рассмотрения?

Сравнение программ курсов показывает, что во всех программах есть некая инвариантная часть со времен А.А.Андропова - часть, касающаяся изложения теории нелинейных колебаний на плоскости, называемая сейчас классической теорией колебаний. В современных учебных планах по радиофизике эта часть присутствует под названием «Основы теории колебаний». Кроме этого в последние 40 –50 лет сформировалась и приобрела законченность теория нелинейных волн. Все это говорит о том, что в современных программах по радиофизике как общеспециальная дисциплина, наряду с другими, должна выступать именно дисциплина «Теория нелинейных колебаний и волн» (как единый курс или как два курса). На фоне реализующейся сейчас идеи разделения обучения на программы бакалавриата, магистратуры и аспирантуры весьма актуальной становится задача оптимизации процесса обучения.

Приведенный выше анализ изменений, происходивших с курсом лекций по теории колебаний, позволяет считать для радиофизиков наиболее целесообразной следующую последовательность обучения:

Бакалавриат: Основы теории нелинейных колебаний и волн;

Магистратура: Современные проблемы теории нелинейных колебаний и волн (многомерные динамические системы, динамический хаос, синхронизация, структурообразование);

Аспирантура: Обзорные лекции и семинары по программе кандидатского минимума и новейшим достижениям по разделу «теория колебаний и волн».

Несомненно, что курс лекций по теории колебаний и волн может быть ориентирован не только на студентов – физиков, но и на студентов других

специальностей - биологов, химиков, студентов социально-экономических специальностей и т.д. В этом случае курс теории колебаний, как курс по физике колебательно-волновых процессов и систем, должен трансформироваться в курс нелинейной динамики с акцентом на примеры из соответствующих областей применения. Здесь основным содержанием курса станут методы исследования нелинейных систем и содержательные примеры из соответствующей области знания.

Проведенный ретроспективный анализ развития курса лекций по теории колебаний - это своеобразный взгляд в прошлое колебательно - волновой науки. Однако, такой взгляд на теорию колебаний сквозь призму прошлого несомненно полезен для осмысления современного состояния теории колебаний и направлений ее развития в будущем.

Теория колебаний, или, говоря современным языком, нелинейная динамика [7], находится сейчас на этапе интенсивного развития. Большинство процессов и явлений, которыми занимается современная наука, включают в себя время в качестве переменной, то есть основной интерес при изучении этих процессов и явлений связан с динамическими закономерностями. Динамика современных технических, биологических, глобальных социо-экономических процессов и систем обладает исключительной сложностью. Тем не менее, несмотря на эту сложность, на довольно больших отрезках времени поведение этих систем определяют сравнительно простые динамические модели и закономерности. Эти закономерности на ранних этапах развития нелинейной динамики были связаны с движениями типа предельных циклов, торов, а на более поздних этапах определялись странными аттракторами. Для современной нелинейной динамики сложных систем характерно наличие таких объектов, как устойчивые переходные состояния. Переходная динамика с метастабильными состояниями - наиболее адекватная модель динамики сложных систем. Черты такого поведения мы находим сейчас в нейродинамике [11], в социо-экономике и др. Именно на изучении таких моделей, по-видимому, будет ориентирован в будущем курс теории колебаний. Изучение процессов развития сложных систем и их понимание в значительной степени опирается на наличие в них двух характерных процессов современной нелинейной динамики - конкуренции и кооперации (синхронизации). Именно эти процессы, по-видимому, станут своеобразным ключом к пониманию динамики сложных систем.

Авторы благодарны М.И.Рабиновичу за обсуждение материалов.

Приложение

Лекции А.А. Андропова, записанные Н.И. Ашбелем.

Из вступительной лекции: Физика колебаний изучает общие колебательные закономерности. Автоколебания – периодический колебательный процесс, получаемый от непериодического источника (например, провода гудят от ветра, который вовсе не совершает периодических колебаний, вибрация перископа подводной лодки при определенной скорости лодки, автоколебания крыльев самолета).

III курс

1934 год I семестр (1-11 лекции)

Линейные системы с одной степенью свободы и элементы теории нелинейных систем. Гармонические колебания. Примеры колебательных систем: колебания пробирки на воде; колебания пробки, закрывающей сосуд; маятник; электрический контур. Уравнения движения. Особые точки дифференциальных уравнений. Фазовая плоскость. Типы с.р.- седло и центр. Осциллятор с трением. Логарифмический декремент затухания. Сильное затухание. Аперриодическое движение

Линейные системы, обладающие отрицательным трением. Примеры - маятник Фроуда, катодный генератор, схема Мейснера. Энергетическое толкование декремента затухания.

Вопросы идеализации колебательных систем. Вырожденные системы.

Ламповый генератор. Теория вынужденных колебаний.

Системы с конечным числом степеней свободы. Автономные системы, неавтономные системы. Характеристики вынужденных колебаний, резонансные кривые.

Теория переменных токов. Простая цепь переменного тока, векторная диаграмма напряжений. Резонанс напряжений и токов.

1935 год II семестр (12-20 лекции)

Сложные цепи переменного тока. Последовательное и параллельное соединение проводников. Применение комплексного метода. Примеры - схема Бушера, Чарданцева и других; метод трех вольтметров; мостик Уинстона.

О тепловых приборах. Трансформаторы. Графические построения для определения изменения тока

Модуляция и прием. Резонансные кривые, скорость установления амплитуды. Прием идеального модулированного сигнала, искажения. Спектры сигналов. Частотная модуляция. Модуляция звука. Модуляция света. Частотомер. Гетеродинный прием.

Рассмотрение взаимодействия колебательных систем. О биениях. Спектральные разложения для определения оценки действия сил на линейный резонатор. Комплексный интеграл Фурье. Теорема Релея. Мера распычивости, теорема Мандельштама.

Теория атома. Задача о движении материальной частицы в классической и волновой механике. Элементарная теория атмосферных помех.

Параметрический резонанс. Учет трения. Зоны Матье

Теория линейных дифференциальных уравнений с периодическими коэффициентами. Теорема Флоке

IV курс

1935 год I семестр (21-45 лекции)

Классификация колебательных систем – автономные, неавтономные, диссипативные, автоколебательные. О нелинейности и идеализации.

Фазовая плоскость. Особые точки состояния равновесия. Об устойчивости движения. Устойчивость по Ляпунову. Метод изоклин. Примеры - маятник Фроуда (автономная система); схема детекторного приемника (неавтономная система).

Типы состояний равновесия. Ламповый генератор - уравнения, состояния равновесия.

Консервативные системы (с использованием уравнений Гамильтона). математическая характеристика консервативных систем. Поведение фазовых

траекторий вблизи состояния равновесия – экстремум потенциальной энергии. Центр, седло, построение сепаратрис. Уравнения изоклин. Маятник Фроуда (автономная система). Схема детекторного приемника (неавтономная система).

Плоскость параметров. Бифуркационная диаграмма.

Катодная лампа. Диод. Триод. Статические и динамические характеристики. Экранированная лампа. Динатронный эффект. Усилители на сопротивлении. Усилитель с несколькими каскадами.

Катодная лампа как детектор. Приемники прямого усиления, супергетеродин. Катодная лампа как источник автоколебаний. Динатрон с последовательным включением. Схема Мейснера – составление уравнений, определение амплитуд, условия возбуждения. О балансе энергии автоколебательной системы. Условие возбуждения генератора. О мягком режиме. Синусоидальные колебания генератора. Нахождение стационарных амплитуд при жестком режиме для различных параметров. Бифуркационная диаграмма.

Метод резонансных членов. Генератор с Z - характеристикой. Метод припасовывания начальных условий. О мощности генератора.

Разрывные колебания - условия получения таких уравнений, способ Ляпунова определения устойчивости состояния. Условие скачка. Пример – маятник Фроуда без груза; электрическая релаксационная схема (пример Мандельштама).

1936 год II семестр (46-72 лекции)

Метод Ван-дер Поля для автономных систем. Область применения. Безразмерные переменные и параметры. Полные и укороченные уравнения Ван-дер Поля и ее связь с фазовой плоскостью системы. Мягкий и жесткий режимы возбуждения генератора. Бифуркационные диаграммы. Динатронный генератор. Поправка на частоту.

Качественная теория поведения фазовых траекторий для систем 2-го порядка. Линеаризация. Типы состояний равновесия. Фазовая плоскость для различных типов состояний равновесия для разных параметров.

Примеры – вольтова дуга, мультивибратор Абрама-Блоха, асинхронный мотор, схема Мандельштама.

Уравнение с малым параметром при старшей производной - разрывные колебания, как предельный случай колебаний, когда один из параметров стремится к нулю.

Метод последовательных приближений, определение предельных циклов, фазовый портрет для устойчивых и неустойчивых циклов. Устойчивость в большом. Циклы без контакта. Индексы Пуанкаре. Зависимость качественной картины интегральных кривых от параметра. Критерий Бендиксона. Пример: кипп-реле. Об устойчивости предельных циклов.

Действие внешней силы на нелинейную систему. Исследование с помощью метода Ван-дер Поля. Вибрационный гальванометр (по статье А.Г. Любиной 1934 г.) Резонансные кривые, нелинейный резонанс (срывы).

Захватывание, мягкий режим, резонансные кривые на плоскости. Интервал захватывания при слабом и сильном сигнале. Качественная картина на плоскости переменных Ван-дер Поля.

Случай действия внешней периодического сигнала на автоколебательную систему, когда частота внешнего сигнала приблизительно в 2 раза больше собственных колебаний системы. Резонанс 2-го рода

Действие сигнала на несамовозбужденную систему. Асинхронное воздействие – тушение и возбуждение.

V курс

1936 год I семестр (73-115 лекции)

Связанные линейные консервативные системы с 2 степенями свободы. Вековое уравнение, нормальные частоты, коэффициенты распределения. Различные начальные условия. Парциальные системы и парциальные частоты. Для связанных маятников – парциальные, нормальные частоты, связь и связанность. Кратные частоты. Автоколебательная система с двумя степенями свободы. Нормальные координаты.

Теория дискретных систем со многим степенями свободы.

Действие внешней синусоидальной силы на линейную консервативную систему с 2 степенями свободы. Резонанс.

Теория телефона, применение теории переменных токов. Диссипативная линейная система. Решение векового уравнения. Общее решение уравнений.

Теория фильтров. Постановка задачи о фильтрах на языке теории переменных токов. Электротехническая теория фильтров. Об акустических фильтрах. Теория кристаллической решетки (приложение теории колебаний к теории строения вещества)

Классическая теория теплоемкости.

Общая теория нелинейных дискретных систем. Грубая система в пространстве. Системы 3-го порядка, генератор с дополнительным контуром, центробежный регулятор.

Теория распределенных систем. Струна, антенна (разные граничные условия), крутильные колебания вала, воздушные волны. Исследование колебаний стержня (собственные и вынужденные колебания).

Общая постановка задачи о вынужденных колебаниях распределенной системы. Общая краевая задача. Понятие об общей проблеме собственных значений (проблема Штурма-Лиувилля). Элементарная теория колебаний (поперечных) стержней. Поперечные колебания стержня с массой на конце (задача Релея).

Понятия о скорости распространения возмущения в распределенных системах. Дисперсия, фазовая и групповая скорость.

Литература

1. Физический энциклопедический словарь (статья о радиофизике). М.: Советская энциклопедия, 1984.
2. Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972
3. Андронов А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. Ч. 1, М.-Л.: ОНТИ, 1937
4. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний, 2 изд. М.: Физматгиз, 1959
5. Мотова М.И., Шалфеев В.Д. А.А.Андронов и зарождение кибернетики в Горьковском университете. Н.Новгород: изд. ННГУ, 2013
6. Личность в науке. А.А.Андронов, Документы жизни. Н.Новгород: изд. ННГУ, 2001
7. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Л.И. Мандельштам и современная теория нелинейных колебаний и волн, УФН т.128, вып.4, 1979, стр.579.
8. Рабинович М.И, Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн.- М.: Наука, 1984
9. Сб. задач по теории колебаний под ред. Постникова Л.В. , Королева В.И.- М.: Наука, 1987.

10. Рабинович М.И., Мотова М.И., Тарантович Т.М. Колебания и волны в нелинейных системах, учебное пособие. Г.: изд. ГГУ, 1978.
11. Рабинович М.И., Мюезинолу М.К. Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность. УФН, т.180, вып.4, 2010, стр. 371.