

В.В. Дубинин, В.В. Витушкин

**ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС ДИНАМИКИ
МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Представлены результаты многолетней оригинальной научно-исследовательской работы, проводимой на кафедре «Теоретическая механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию и совершенствованию исследовательского комплекса динамики механических систем, который предназначен для применения в научной работе и учебном процессе. Комплекс включает в себя модельные установки, позволяющие проводить исследования по отдельным разделам механики, автоматизированные лабораторные установки с применением современных информационных технологий.

E-mail: fn3@bmstu.ru

Ключевые слова: механические системы, динамика, экспериментальные модели, информационные технологии исследований.

Великий русский ученый Николай Егорович Жуковский заложил основы практического использования теоретической механики во многих технических приложениях. Он ввел в методику обучения студентов ИМГУ (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана) практические занятия, сопряженные с исследовательской работой. Следуя этим установленным традициям, физический эксперимент и лабораторные работы на реальных моделях натуральных установок на кафедре считают неотъемлемой частью учебного процесса в техническом университете.

К настоящему времени, в дополнение к большому числу существующих демонстрационных приборов, создан ряд снабженных измерительными устройствами установок [1—3], позволяющих проводить лабораторные работы по изучению основных теорем и аксиом механики («Трехшарнирная арка» [2], «Конус трения» [3], «Сочлененная система трех тел», «Равновесие механизма», «Шарнирный четырехзвенник с кулисным механизмом» и др.).

Например, установка «Трехшарнирная арка» позволяет не только наглядно демонстрировать выполнение аксиомы статики о равновесии тела под действием двух сил и теоремы о равновесии тела под действием трех сил, но также измерять силы и с достаточно высокой точностью проводить эксперименты, подтверждающие выполнение указанных аксиомы и теоремы. Установка «Конус трения» предназначена для проведения исследований по определению коэффициентов трения скольжения разных пар материалов и решения практических задач о равновесии тела при различных случаях нагружения под действием системы сходящихся сил.

Вместе с тем современный уровень инженерной науки и техники предъявляет все более высокие требования к использованию информационных технологий как в научно-исследовательской работе, так и в

образовании [4, 5]. В связи с этим на кафедре теоретической механики МГТУ им. Н.Э. Баумана была создана лаборатория исследовательского типа, сочетающая в себе наглядность механических процессов, исследуемых на специально разработанных моделях (установках), и высокий уровень использования информационных технологий в проведении и обработке результатов экспериментов. Эта лаборатория используется в учебном процессе по дисциплинам «Теоретическая механика» и «Теория колебаний» [6—8].

Инновационные работы по внедрению лаборатории в учебный процесс проводились совместно с РНПО «Росучприбор».

Перед создателями этой лаборатории стояли следующие задачи:

разработать и создать установки, моделирующие реальные механические явления;

обеспечить наивысший уровень использования информационных технологий при постановке эксперимента и обработке его результатов;

разработать программы исследования на каждой модельной установке;

внедрить работу лаборатории в учебный процесс и создать методическое обеспечение лабораторных работ;

создать теорию моделирования механических процессов на модельных установках и методику переноса результатов модельных испытаний на натуру.

Лаборатория включает в себя модельные установки: «Наклонная плоскость» — для изучения закономерностей плоскопараллельного движения твердого тела, «Двухстепенной гироскоп» — для исследования прецессионного движения и гироскопических моментов; «Бегуны» — для определения гироскопического давления, «Динамические реакции подшипников» — для исследования динамических реакций в одном из подшипников вала («плавающем»); «Физический маятник» — для исследования свободных колебаний физического маятника с учетом сил упругости и трения; «Двойной маятник» — для экспериментального и теоретического исследования колебаний парциальных систем и главных колебаний системы с двумя степенями свободы; «Вынужденные колебания механической системы с инерционным возмущением» — для демонстрации и исследования характеристик свободных и вынужденных колебаний; «Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы» — для демонстрации и изучения характеристик вынужденных колебаний твердого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси. Эти установки в настоящее время применяют как в учебном процессе, так и в научно-исследовательской работе.

Каждая из лабораторных установок представляет собой программно-аппаратный комплекс, содержащий экспериментальную модель исследуемого объекта, снабженную различного рода датчиками механических величин (сил, перемещений, скоростей и т. д.), аналого-

цифровой преобразователь и ПЭВМ. Такой комплекс позволяет автоматизировать проводимые эксперименты — вводить и обрабатывать параметры исследуемых процессов, задавать и поддерживать режимы работы установок. В основу построения лабораторных установок заложен принцип выявления взаимосвязи между теоретическим описанием процесса (явления), результатами его математического моделирования и экспериментального исследования. Результаты экспериментов обрабатываются на ПЭВМ и отображаются в реальном масштабе времени. Программное обеспечение установок выполнено в среде LabVIEW 7.0 в разработанном на кафедре оригинальном исполнении. Таким образом, каждая из лабораторных установок создана и изготовлена так, что целый комплекс исследований проводится с автоматизированной записью и обработкой результатов проведенных испытаний.

Далее рассмотрим некоторые возможности исследований динамики механических систем на установках данной лаборатории.

Лабораторная установка «Наклонная плоскость» включает в себя экспериментальную модель в виде двух наклонных плоскостей и пары цилиндрических тел с одинаковыми массой и внешними размерами, но с различными осевыми моментами инерции (рис. 1). Она позволяет визуально наблюдать различие кинематических параметров движения, а также экспериментально определять эти параметры путем преобразования и обработки электрических сигналов датчиков положения центров масс тел. В двух имеющихся вариантах модели используются датчики разного типа: потенциометрические на направляющих наклонных плоскостей и оптические. Графики испытаний в виде зависимостей от времени напряжений на датчиках, перемещений и скоростей центров масс тел, а также отношения этих скоростей, полученные при моделировании, выводятся на монитор ПЭВМ. На наклонных плоскостях проводят исследования влияния осевых моментов инерции тел на их качение без скольжения вниз и вверх по направляющим, а также замеры коэффициентов трения качения.

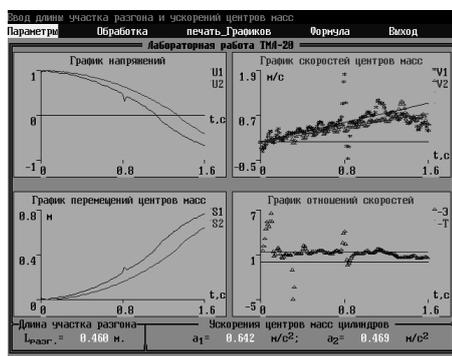


Рис. 1. Общий вид комплекса «Наклонная плоскость» и графики испытаний движения тел

Лабораторная установка «Двухстепенной гироскоп» предназначена для проведения исследований прецессионного движения гироскопа и измерения гироскопических моментов. Установка представляет собой модель двухстепенного гироскопа — гиротаксметра (рис. 2). Маховику (ротору) 1 сообщается собственная угловая скорость ω_1 . Маховик, установленный на оси AB , может вращаться вокруг нее на шарикоподшипниках, установленных в его корпусе. Ввиду малого трения в подшипниках маховика и короткого времени эксперимента можно считать, что $|\omega_1| = \text{const}$. Ось AB установлена в опорах 2 внутренней рамки 9, которая, в свою очередь, может поворачиваться вокруг оси 4, закрепленной во внешней рамке 3. На рамке 9 жестко укреплена пружина 8, а на рамке 3 установлены упоры 7. При повороте рамки 9 вокруг оси 4 пружина 8 опирается своим плечом на один из упоров 7.

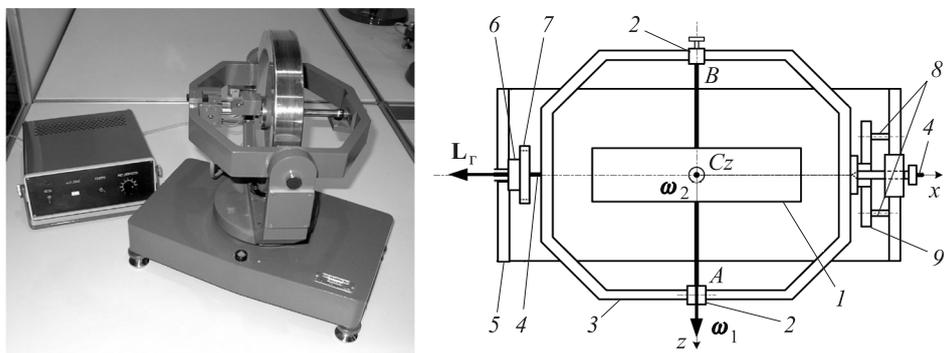


Рис. 2. Общий вид установки «Двухстепенной гироскоп» и ее схема

После приведения во вращение маховика рамке 3 посредством электродвигателя, установленного в корпусе установки, сообщается постоянная угловая скорость вращения ω_2 вокруг вертикальной оси Cz . В результате этого появляется гироскопический момент L_{Γ} . Рамка 9 поворачивается на небольшой угол, пропорциональный угловой скорости ω_2 . Этому повороту рамки препятствует момент упругих сил пружин, равный гироскопическому моменту. Поворот рамки 9 через повышающий зубчатый редуктор 6 передается потенциометру 5 — датчику угловой скорости поворота рамки и, таким образом, определяется угловая скорость ω_2 .

Данная установка при освобождении одной из опор 2 позволяет также демонстрировать действие гироскопического момента на гироскоп с тремя степенями свободы, приводящее к его повороту вокруг второй опоры и подъему в вертикальной плоскости.

Лабораторная установка «Бегуны» представляет собой модель мельничных бегунов, шарнирно закрепленных на вертикальной оси, связанной с приводом вращения, которая приводится во вращение с помощью электродвигателя (рис. 3). «Бегуны», перекатываясь по платформе, получают угловую скорость вращения вокруг собствен-

ной оси симметрии, что приводит к появлению динамического (гироскопического) давления на платформу, подпружиненную относительно неподвижного основания установки. Установка оснащена датчиками угловой скорости вращения «бегунов» вокруг вертикальной оси (переносная угловая скорость) и осадки λ платформы. Расчетные и экспериментальные кривые $\lambda = \lambda(\omega_2)$ выводятся на экран виртуального прибора в среде LabVIEW.

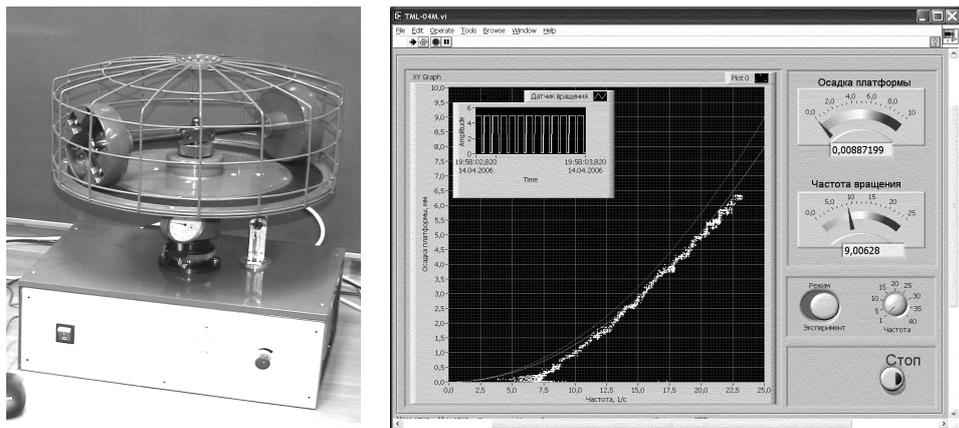


Рис. 3. Общий вид лабораторной установки «Бегуны» и зависимость $\lambda = \lambda(\omega_2)$ на экране виртуального прибора

Установки «Бегуны» и «Двух-, трехступенной гироскоп» позволяют проводить весьма широкий класс экспериментов исследовательского плана:

строить зависимость гироскопического давления бегунов от угловой скорости прецессии бегунов;

использовать гироскоп в качестве гиротакметра (измерителя угловой скорости).

исследовать подъем оси ротора гироскопа при одном незакрепленном подшипнике оси ротора.

На установках исследуются случаи зависимого (бегуны) и независимого (гироскоп) создания собственной угловой скорости оси ротора. В первом случае собственное вращение возникает за счет задания угловой скорости прецессии бегунам, во втором — собственное вращение и прецессия создаются независимо.

Лабораторная установка «Динамические реакции подшипников» обеспечивает демонстрацию и исследование реакций подшипников в динамически несбалансированной механической системе. Модель системы представляет собой рамку с грузами, устанавливаемыми в различных положениях (рис. 4). Посредством электропривода рамка приводится во вращение вокруг ее продольной оси симметрии. Один из подшипников рамки установлен с возможностью перемещения в горизонтальном, перпендикулярном оси вращения, направлении и снабжен центрирующими пружинами. При изменении угловой ско-

рости вращения рамки регистрируются пропорциональные динамической реакции смещения подшипника и строится зависимость значений реакции от угловой скорости вращения. Теоретическая кривая, построенная на основе измеренных параметров установки, вместе с экспериментальной кривой выводится на экран дисплея ПЭВМ.

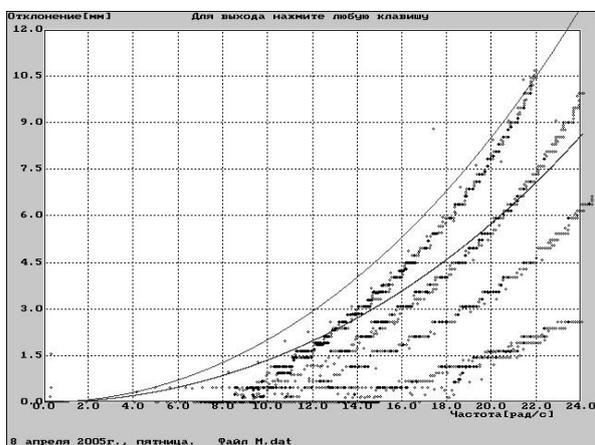
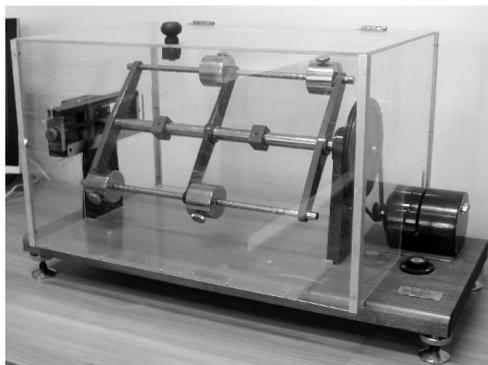


Рис. 4. Общий вид установки «Динамические реакции подшипников» и экспериментальные и расчетные зависимости

Установка обеспечивает многообразные возможности создания динамической неуравновешенности вращающейся рамки с грузами. В процессе исследований найдены «критическая» и «предельная» угловые скорости вращения рамки. Продолжаются эксперименты по изменению конструктивных параметров установки с целью моделирования реальных случаев динамической неуравновешенности в механической системе.

Тема «Теория колебаний механических систем» представлена в лаборатории четырьмя установками. Установки «Физический маятник» и «Двойной маятник» используют для изучения свободных колебаний. Вынужденные колебания изучают в лаборатории при двух различных способах возбуждения колебаний: кинематическом через упругий элемент и инерционном.

Лабораторная установка «Физический маятник» позволяет исследовать влияние сил сопротивления на свободные колебания (рис. 5).

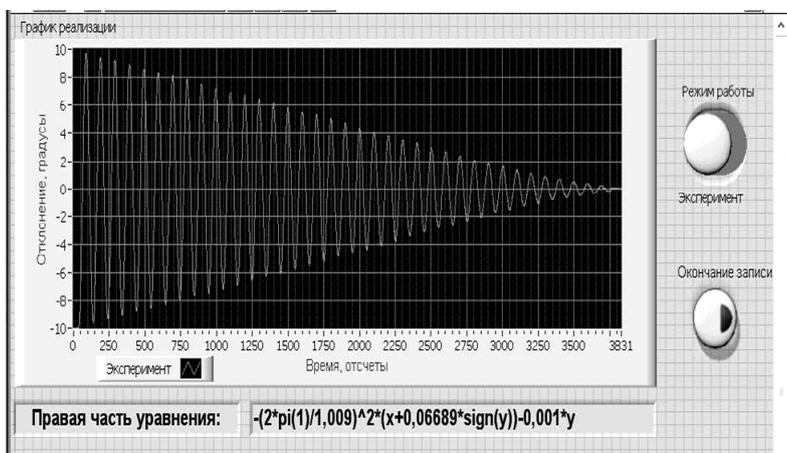
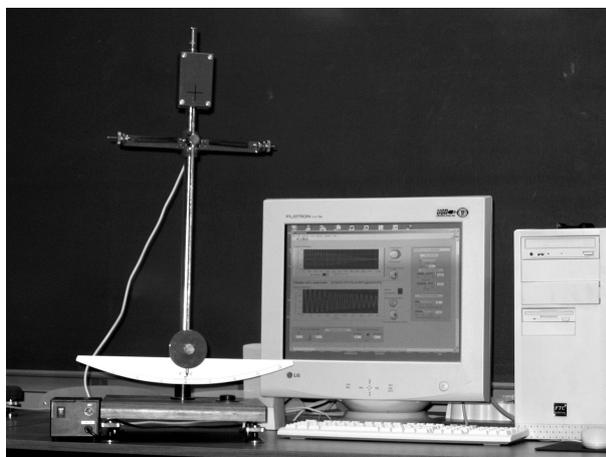


Рис. 5. Внешний вид лабораторной установки «Физический маятник» и графики колебаний на экранах панели виртуального прибора

Экспериментальная установка комплекса содержит однородный стержень, прикрепленный к вертикальной стойке неподвижного основания с помощью цилиндрического шарнира, имеющего горизонтальную ось. На стержне установлены груз и муфта для крепления пружин, свободные концы которых закреплены на кронштейне стойки. При проведении экспериментов расстояния от точек крепления муфты и груза до оси шарнира стержня могут изменяться. Пружинам задана начальная (статическая) деформация, обеспечивающая их работу только на растяжение. В шарнирном узле стержня расположен датчик (потенциометр), фиксирующий угол отклонения стержня от вертикали и позволяющий вводить в ЭВМ и отображать на экране монитора процесс колебаний.

Как известно, теоретический расчет сопротивления в механической системе весьма затруднителен. Исследование свободных колебаний физического маятника позволяет определять коэффициент сопротивления. Кроме того, в данном комплексе предусмотрена возможность подбора уравнения колебаний и анализ сопротивления в системе: определение коэффициентов вязкого сопротивления и сухого трения скольжения. Разработанную методику определения коэффициента сопротивления используют при изучении вынужденных колебаний систем.

Установка также позволяет определять положение устойчивого равновесия. В модели предусмотрена возможность изменения конструкции маятника, что позволяет изучать влияние таких изменений на собственную частоту и коэффициент сопротивления в механической системе.

Лабораторная установка «Двойной маятник» дает возможность проводить исследование колебаний парциальных систем и главных колебаний системы с двумя степенями свободы. Она представляет собой двойной физический маятник, состоящий из двух тонких стержней с шарнирами O_1 , O_2 , на концах которых сосредоточены тела силой тяжести P_1 и P_2 соответственно (рис. 6).

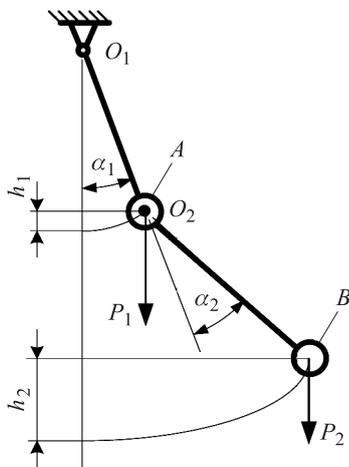
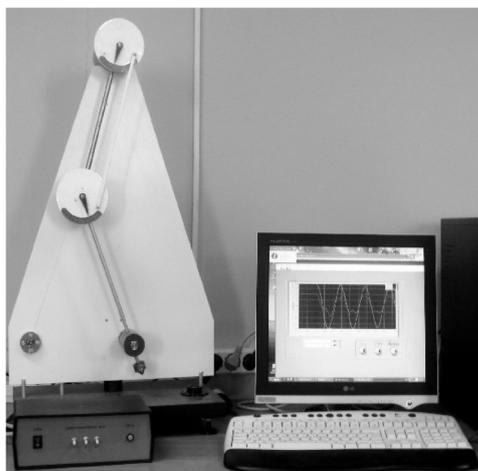


Рис. 6. Общий вид лабораторной установки «Двойной маятник» и схема маятника

Установка позволяет при выбранных обобщенных координатах α_1 и α_2 экспериментально определять парциальные частоты, а также собственные частоты двойного маятника и коэффициенты форм главных колебаний (рис. 7).

При изучении вынужденных колебаний систем для характеристики работы реальных установок актуальной проблемой является получение амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик. Однако испытания на промышленных образцах сопряжены со значи-

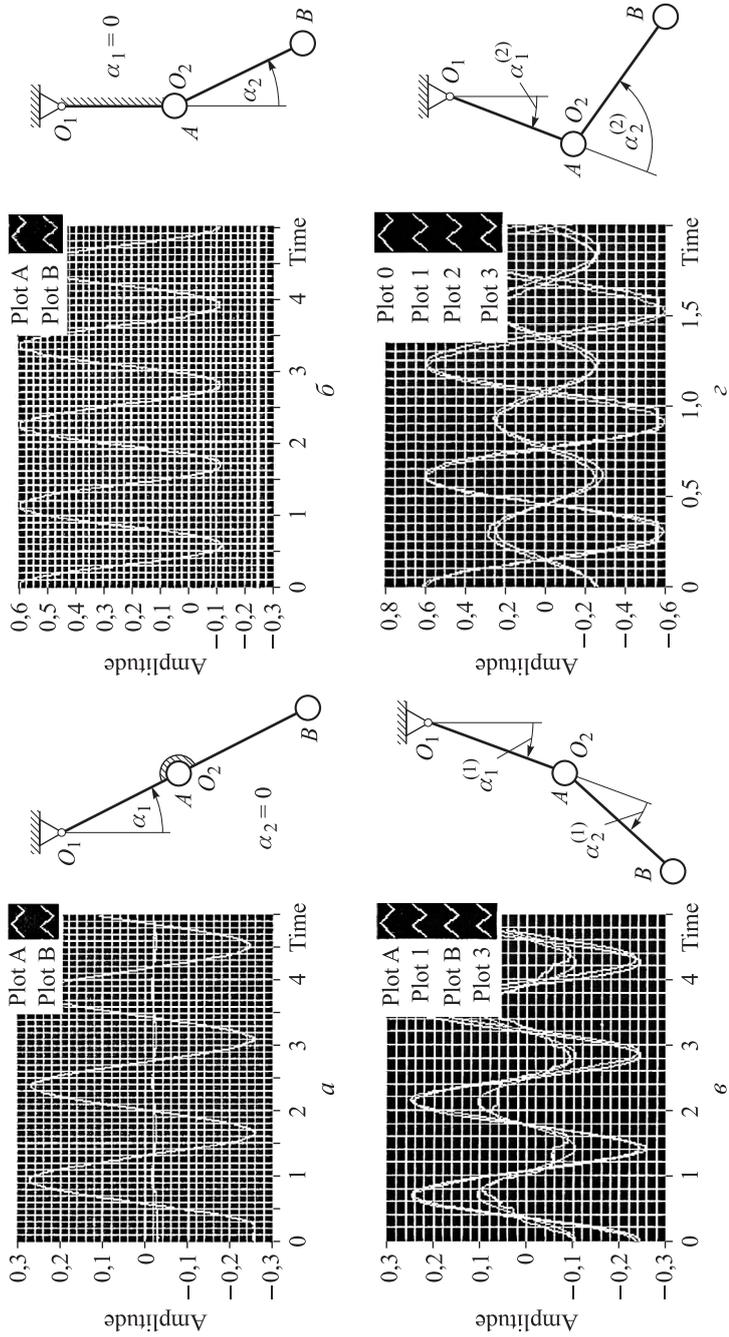


Рис. 7. Колебания первой (а) и второй (б) частичных систем, первое (а) и второе (б) главные колебания двойного маятника

тельными трудностями или их невозможно выполнить. В этом случае можно использовать модельные установки — приборы для получения АЧХ и ФЧХ реальных установок. В первом приближении необходимо определить характеристики реальной установки — собственную частоту и сопротивление — и получить добротность Q_H натурной системы. Затем подобрать режим на модельной установке так, чтобы ее добротность Q_M была равна Q_H ($Q_M = Q_H$). Полученные на модели АЧХ, ФЧХ в безразмерных параметрах представляют собой АЧХ, ФЧХ реальной (натурной) установки.

Лабораторная установка «Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы» предназначена для изучения вынужденных колебаний при кинематическом возбуждении колебаний через упругий элемент. Она состоит из экспериментального стенда с блоком управления, аналого-цифрового преобразователя и персональной ЭВМ (рис. 8).

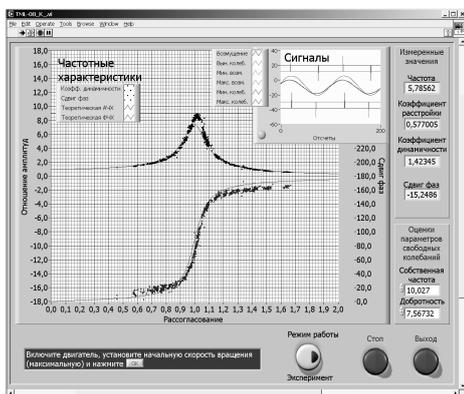


Рис. 8. Общий вид лабораторной установки; амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики системы

Стенд включает в себя электродвигатель, установленный на неподвижном основании и соединенный с внешним концом спиральной пружины через муфту, червячный редуктор и кривошипно-рычажный механизм с регулируемым эксцентриситетом. Внутренний конец этой пружины закреплен на валу с диском, обеспечивает передачу возмущающего воздействия от двигателя диску. Угловые отклонения рычага и диска измеряются с помощью потенциометрических датчиков, связанных с осями рычага и диска через зубчатые передачи. Показания датчиков обрабатываются и выводятся в процессе эксперимента на экран виртуального прибора в виде АЧХ и ФЧХ системы. В проводимых исследованиях изучалось влияние изменения сопротивления в системах с помощью электромагнитного демпфера.

Как следует из рис. 8, экспериментальные точки достаточно близки к теоретическим кривым (которые также выводятся на дисплей), что подтверждает правомерность использования линейной математической модели для описания вынужденных колебаний диска.

Лабораторная установка «Вынужденные колебания механической системы с инерционным возмущением» представляет собой механическую систему, состоящую из тележки 1, перемещающейся на неподвижном основании по направляющим (рельсам) 8 в горизонтальном направлении, и установленного на тележке маятника (рис. 9). Маятник выполнен в виде груза 2, который можно закреплять на стержне 3 на различных расстояниях от оси О поворота маятника, перпендикулярной направлению движения тележки. Установка приводится в движение с помощью электродвигателя, закрепленного на тележке. Вращение вала двигателя через червячный редуктор 7 и кривошипный механизм 4—6 передается маятнику.

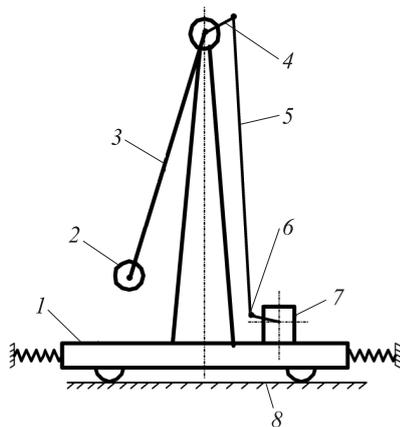


Рис. 9. Общий вид и схема лабораторной установки

Таким образом, маятник совершает вынужденные колебания в соответствии с законом, близким к синусоидальному. Эти колебания и обеспечивают формирование возмущающего воздействия на тележку. Угловые отклонения маятника измеряются с помощью потенциметрического датчика, установленного на его оси. Для измерения перемещений тележки на ней установлен индуктивный датчик.

На рис. 10 для одного из вариантов физических параметров установки показаны рассчитанные теоретически кривые АЧХ и ФЧХ вынужденных колебаний тележки, экспериментальные значения коэффициента динамичности и разности фаз вынужденных колебаний и возмущающего воздействия (показаны точками).

Для двух способов возбуждения вынужденных колебаний (см. рис. 8, 10) с хорошей точностью построены ФЧХ после тщательной отладки режимов работы установок. Режимы работы установок в области резонанса неустойчивы. При проведении экспериментов в районе резонанса наблюдается влияние на АЧХ нелинейных эффектов. Происходит сдвиг «петли» АЧХ в районе резонанса вправо и наблюдается срыв экспериментальных точек. Срыв небольшой, так как установка сделана тщательно под линейную модель работы механической системы.

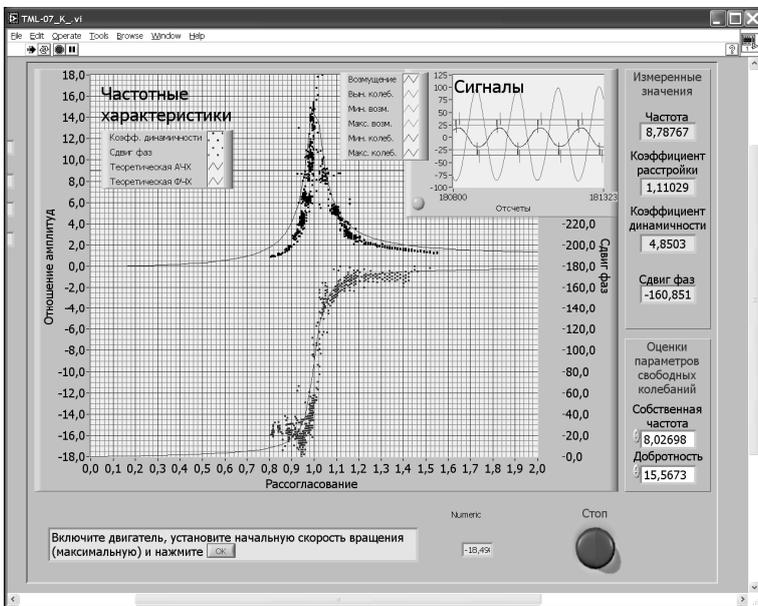


Рис. 10. Теоретические и экспериментальные АЧХ и ФЧХ системы

Представленная работа по созданию лаборатории включает в себя множество аспектов: от замысла создания модельных установок, отвечающих наиболее актуальным вопросам механики, до их реализации, отладки, создания программно-сервисного обеспечения. Эта работа, сопровождавшаяся тщательной методической проработкой экспериментов, связана с созданием математических моделей исследуемых явлений и их экспериментальной проверкой. Следовательно, лаборатория позволяет соединить физический эксперимент с математическим моделированием на основе высоких информационных технологий.

Проводимые в лаборатории эксперименты и предоставляемые возможности для развития дальнейших исследований в полной мере подтверждают идею ее создания как лаборатории исследовательского типа.

Лаборатория качественно обогащает учебный процесс наглядной демонстрацией, экспериментальной проработкой изучаемых явлений и открывает широкие перспективы для физического моделирования работы реальных объектов промышленности.

Реализованная в лаборатории методика замера физических величин и высокая степень автоматизации обработки результатов экспериментов позволяет создавать достаточно простые и дешевые модели реальных агрегатов и исследовать их работу в различных условиях, которые могут быть заложены в эксперимент. При этом разработанные модели можно также использовать в учебном процессе для иллюстрации прикладной стороны тех или иных разделов изучаемых дисциплин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кинематика и статика: метод. указания по проведению практических занятий с использованием моделей и приборов по курсу «Теоретическая механика» / Под ред. В.В. Дубинина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1988.
2. Использование установки «Трехшарнирная арка». Практические задачи / В.В. Дубинин, В.В. Витушкин. М.: 2007.
3. Использование установки «Конус трения». Практические задачи / В.В. Дубинин, В.В. Витушкин. М.: 2007.
4. Использование ЭВМ в учебном процессе при изучении курса «Теоретическая механика» / В.В. Дубинин, Е.Н. Солохин, А.В. Ремизов и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000.
5. Дубинин В.В., Жигулевцев Ю.Н., Назаренко Б.П., Ремизов А.В. О внедрении новых информационных технологий в учебный процесс по курсу «Теоретическая механика». Научно-методическая конференция, посвященная 35-летию образования факультета «Фундаментальные науки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. 20 декабря 1999 г. С. 65—66. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999.
6. Дубинин В.В. Физический эксперимент в некоторых задачах механики // Труды зонального совещания-семинара заведующих кафедрами теоретической механики Центрального и Приволжского федеральных округов РФ. Ульяновск, 2002. С. 14—15.
7. Дубинин В.В., Витушкин В.В., Назаренко Б.П. Современный лабораторный комплекс по теоретической механике. Интеграция образования, науки и производства // Материалы секционного заседания Международной конференции IX Международного форума «Высокие технологии XXI века». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 153—156.
8. Информационные технологии и физический эксперимент в механике / В.В. Дубинин, В.В. Витушкин, Г.И. Дубровина. М., 2008. № 1.

Статья поступила в редакцию 14.09.2012