## Российская Федерация

Дальневосточный государственный

университет путей сообщения

Кафедра

“Строительные конструкции”

Г.С. Якутин

**ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ**

**(методическое пособие)**

Хабаровск

2005

Российская Федерация

Дальневосточный государственный университет путей сообщения

Кафедра "Строительные конструкции"

Г.С. Якутин

**ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ**

**Методическое пособие**

Хабаровск

2005

**Р Е Ц Е Н З И Я**

на методическое пособие

"ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ".

Автор Якутин Г.С.

Методическое пособие составлено в соответствии с программой курса "Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений" отражают раздел "Испытание конструкций динамическими нагрузками, проведение испытаний в лабораторных условиях, обработка результатов, определение погрешности" и предназначено для студентов специальности 2903 "Промышленное и гражданское строительство" всех форм обучения.

Пособие разработано для изучения метода определения характеристик строительных конструкций динамическими нагрузками, содержит краткие теоретические предпосылки из теории и практики, числовые примеры. Материал освещает лабораторную работу, в которой изложена методика определения искомых параметров натурной конструкции посредством испытания вибрационной нагрузкой. Для большей наглядности в пособии приведен пример испытания стальной балки с целью определения частоты собственных колебаний, динамического напряжения и погрешности в полученных экспериментальных результатах. Дан наглядный пример заполнения журналов испытаний. Даны контрольные вопросы для самостоятельной подготовки студентов.

Уровень изложения материала отвечает современным требованиям.

Методическое пособие рекомендуются к изданию.

Профессор кафедры

"Здания и сооружения" ДВГУПС \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ П.Я. Гртгорьев

УДК

ББК

Я

Рецензент:

Профессор кафедры "Здания и сооружения" ДВГУПС, Грыгорьев В.А.

Якутин Г.С.

Я..... ИСПЫТАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ. Методическое пособие по выполнению лабораторной работы - Хабаровск: Изд-во ДВГУПС. 2005 г. ил.

Изложены вопросы теории и практики испытания конструкций динамическими нагрузками. Наглядно показан конкретный пример испытания конструкции на её физической модели динамической нагрузкой. Приведены некоторые сведения, необходимые для статистической обработки результатов исследований. Дан пример заполнения журнала испытания.

Методическое пособие предназначено для студентов специальности 2903 "Промышленное и гражданское строительство", 2915 "Экспертиза и оценка недвижимости" всех форм обучения.

© Якутин Г.С.

© Изд-во Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС), 2005

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ..................................................................................................6

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ...........................................................7

2. ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЕЙ...........................................................................12

2.1. Задачи, решаемые испытанием моделей................................................15

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ....................................................................15

3.1. ИСПЫТАНИЯ НАТУРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ.....................................................16

3.2. ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМОЙ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ......17

4. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ....................................................................22

4.1. Экспериментальное определение частоты свободных колебаний конструкции...............................................................................................22

4.2. Определение динамических коэффициентов.........................................23

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. "ДИНАМИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ".............................................................................................21

4.1. Виброизмерительные приборы..........................................................21

* + 1. Сведения о теории и классификация приборов........................21

Техника безопасности при выполнении лабораторной работы

2 Цели и задачи работы

Оборудование и приборы.

Порядок выполнения работы

Содержание отчёта

Контрольные вопросы

ПРИЛОЖЕНИЕ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**ВВЕДЕНИЕ**

Развитие народного хозяйства России, интенсификация, механизация и автоматизация, производства вызывают необходимость строительства новых промышленных комплексов и модернизацию существующих заводов. Расширение производства, установка нового более мощного, высокопроизводительного оборудования ведёт к увеличению нагрузок, передающихся на несущие строительные конструкции зданий и сооружений, а следовательно, и к всё большему влиянию на них динамических воздействий, в том числе и групповых, от большого количества однотипных машин и механизмов.

Динамические напряжения и деформации в рельсах, динамическая устойчивость земляного полотна и влияние динамических воздействий на расположенные рядом с путями здания и сооружения являются важными проблемами для железнодорожного транспорта. Эти проблемы многократно возрастают по мере увеличения скорости движения, нагрузки на ось и грузового потока на стальных и автомобильных магистралях.

Возрастающее стремление к экономичному использованию застраиваемых территорий ведёт к дальнейшему увеличению этажности зданий и высоты сооружений, что приводит к значительному увеличению динамической составляющей ветрового напора (пульсация ветра).

Часть территории Российской федерации подвержена сейсмическим воздействиям: Кавказ; Камчатка; Сахалин; значительная часть Хабаровского края; Еврейская автономная область и другие районы. Всемирный опыт, приобретённый в результате произошедших катастроф от землетрясений, показал, что экономически целесообразно строить здания и сооружения так, чтобы они успешно противостояли сейсмическим воздействиям с достаточно малой вероятностью разрушения. С этой целью при проектировании необходимо уделить особое внимание к изысканиям, расчёту и конструированию, а при строительстве – к качеству производства работ и безукоризненному исполнению всех проектных рекомендаций. Здания и сооружения с новыми конструктивными схемами обязательно должны быть подвержены экспериментальной проверке принятых допущений, строительно-монтажных работ и надёжной работы здания или сооружения в целом.

Обширная область, связанная с особенностью расчёта строительных конструкций на динамические воздействия, ещё не изучена. Для решения многих вопросов требуются дальнейшие теоретические и экспериментальные проверки и изучение. Метод испытания строительных конструкций и сооружений динамическими нагрузками позволяет проверить расчётные характеристики серийно выпускаемых конструкций, установить расчётную схему построенного здания или сооружения и выявить взаимосвязь между работой отдельных элементов здания (сооружения) и деформативными характеристиками основания. Этим методом несложно установить прочностные и деформативные характеристики земляного полотна на транспортных магистралях.

Роль экспериментальных методов динамическими нагрузками высока, что требует от будущего инженера хорошего знания методов проведения динамических испытаний, умения пользоваться средствами измерения, навыков статистической обработки полученных результатов.

1. **ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИСПЫТАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ**

В соответствии с объектом, задачами и методикой эксперимента, можно выделить три основные группы испытаний динамической нагрузкой:

1. испытание конструкций существующих зданий и сооружений;
2. испытание строительных деталей серийного изготовления;
3. научно-исследовательские испытания.

Указанные испытания выполняются с целью:

* определения влияния динамических нагрузок на прочность, выносливость, жёсткость и трещиностойкость строительных конструкций;
* оценки возможности установки на конструкциях механизмов, создающих динамические воздействия, чтобы не допустить резонанс и вредное влияние вибраций на ход технологических процессов и на условия труда, когда колебания оказывают отрицательное физиологическое воздействие на организм человека;
* разработки мероприятий по уменьшению колебаний;
* проверки расчётных характеристик и качества, серийно изготавливаемых и эксплуатируемых конструкций по частоте и интенсивности затухания собственных колебаний;
* проверка научных гипотез;
* проверка несущей способности новых изобретённых конструкций.

Перечисленные цели и задачи, естественно, не исчерпывают всех вопросов, которые ставятся практикой эксплуатации строительных конструкций в нормальных и, тем более, в особых условиях работы.

Рассмотрим подробнее отдельные задачи динамических испытаний и цели их исследования в зависимости от объектов.

* 1. Сооружения и отдельные конструкции, подлежащие сдаче в эксплуатацию.

Объекты, рассчитанные на воздействие динамических нагрузок (мосты, конструкции ряда промышленных сооружений и т.д.), испытывают с целью проверки их работы в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным условиям. При этом определяют динамические параметры, так, например, по частоте собственных колебаний отдельных элементов можно судить о их жёсткости, а следовательно, и о соответствующем модуле упругости материала; по форме колебаний можно выявить наличие расхождений между принятой расчётной ситуацией и действительной работой исследуемого объекта и т.д. Используют сопоставления прочностных характеристик однотипных элементов в сооружениях путём сравнения частот и интенсивности затухания их собственных колебаний. При незначительной затрате труда и времени могут быть, таким образом, выявлены ослабленные участки в исследуемых объектах.

* 1. Сооружения и конструкции, находящиеся в эксплуатации.

Результаты повторных динамических испытаний, при сопоставлении их с первичными испытаниями, позволяют судить об изменении состояния исследуемого объекта во времени. С этой целью, динамические испытания могут производиться в следующих случаях:

* в плановом порядке, если это предусмотрено правилами эксплуатации;
* после ремонта и усиления конструкций;
* при наличии сомнения в сохранении необходимой несущей способности и жёсткости, например, после пожара, при существенном поражении коррозией и т.п. От статических испытаний, которые могут быть представлены с этой же целью, динамические испытания выгодно отличаются значительно меньшей трудоёмкостью и возможностью проведения их в более сжатые сроки.

При динамических испытаниях эксплуатируемых конструкций могут ставиться и другие задачи. Например, при необходимости размещения нового оборудования с вибрационными воздействиями. В ряде случаев оказывается целесообразным предварительная экспериментальная проверка частот собственных колебаний конструкций, на которые устанавливается оборудование, во избежание нежелательного совпадения этих частот с частотами силовых воздействий, от подлежащих установке агрегатов. Если чрезмерные колебания наблюдаются при работе уже установленного оборудования, аналогичные экспериментальные исследования проводятся с целью обоснования и разработки мер по устранению вибраций.

* 1. Строительные конструкции серийного производства.

Малая трудоёмкость и быстрота проведения динамических испытаний позволяют применять их для контроля качества выпускаемых изделий. Основными параметрами, чувствительными к наличию дефектов и пониженным характеристикам материала в исследуемых изделиях, являются частота и интенсивность затухания их собственных колебаний. Проведённая динамическая проверка не снижает несущей способности испытанных конструкций и не препятствует их использованию по основному назначению.

* 1. Научно-исследовательские.

Проводятся в основном по следующим направлениям:

* + - при применении новых конструктивных решений;
    - при апробации новых методов расчёта;
    - при использовании новых строительных материалов с характеристиками, требующими проверки под действием нагрузки;
    - при особых режимах эксплуатации.

Такие испытания могут производиться как на натурных объектах, так и на моделях с использованием теории моделирования. Рассмотрим одну задачу – влияние многократно повторяющихся нагрузок на прочность материала. При действии таких нагрузок с числом повторений за время эксплуатации конструкции в несколько миллионов раз предел прочности материала в зависимости от характеристики цикла уменьшается. На рисунке 1 изображена кривая зависимости для бетона от характеристики цикла .

1.0

0.8

0.9

0.7

0.6

0.5

0.4

0.3

0.2

0.1

0.075

0.15

0.33

0.5

0.7

0.85

0.925

1.0



Рис. 1. Зависимость относительной прочности бетона от характеристики цикла



Экспериментально установлено, что предел выносливости бетона может снизиться до в зависимости от вида напряжённого состояния. Величина необходима для расчёта конструкций при действии многократно повторяющейся нагрузки.



Экспериментально определяют коэффициент динамичности, который снижает прочность материала в зависимости от цикла . Характеристики циклов даны на рисунках 2, 3.



1. Несимметричный цикл.

Напряжение

σср

σmax

σmin

σα

Цикл

Время

Рис. 2. Характеристика несимметричного цикла

На рисунке 2 введены следующие обозначения:

- напряжение цикла



(1)



- амплитуда цикла



(2)



- коэффициент асимметрии



1. Симметричный цикл

Напряжение

σmax=σα

σmin=σα

Цикл

Время

Рис. 3. Характеристика несимметричного цикла

Если и обратны по знаку, т.е. , то цикл изменения напряжений называется симметричным.

Напряжение

σср

σmax

σmin=0

σα

Цикл

Время

Рис. 2. Характеристика несимметричного цикла



При симметричном цикле среднее напряжение равно нулю.

1. Пульсирующий цикл

Если наименьшее напряжение равно нулю, т.е. , то цикл называется пульсирующим.



При расчёте сооружений, на которые действуют переменные напряжения, основной характеристикой прочности материала является предел выносливости. Пределом выносливости (усталости) называется наибольшее напряжение, которое материал в состоянии выдержать при данной асимметрии цикла неограниченно большое число циклов. Если говорят о пределе усталости, не указывая при этом коэффициент , то в этом случае подразумевается симметричный цикл напряжений.



Целью испытаний материалов на усталость является определение пределов усталости (выносливости) и выявление влияния на их величину различных факторов. Рассмотрим определение предела выносливости при несимметричном цикле. Для этого построим диаграмму из наиболее часто применяемых способов (рисунок 5). По оси абсцисс отложены - средние напряжения циклов, а по оси ординат - предельные амплитуды циклов. Кривая отражает зависимость предельных амплитуд напряжений цикла от средних. Любой цикл может быть охарактеризован координатами точки кривой.



Рис. 5. Зависимость предельных амплитуд напряжений цикла от средних



По предельной кривой прочности определяют величину предела выносливости при данном среднем напряжении. Циклы напряжений ограниченные осью абсцисс, осью ординат и этой кривой представляют безопасные циклы напряжений. Имея такую диаграмму для данного материала, несложно определить амплитуду напряжений, которую может выдержать материал, не разрушаясь при даном среднем напряжении.

1. **ИСПЫТАНИЯ МОДЕЛЕЙ**

Испытания натурных объектов динамической нагрузкой трудоемки и дорогостоящи, однако не представляют возможности решить многие теоретические задачи, связанные со строительством зданий в сейсмических районах и в особых условиях. Как показывает практика, испытания на моделях могут заменить натурные и во многих случаях являются более эффективными, чем натурные. Принципиально на моделях можно решать любые задачи, возникающие на практике, при соответствующем техническом и экономическом обеспечении.

Форма колебаний несущих зависит конструкций от разнообразных факторов: жесткости элементов и узлов их сопряжений на изгиб и сдвиг, влияния связей и диафрагм, нагрузки и последовательности загружения и

разгрузки, деформаций основания. Вследствие этого многие динамические характеристики колебаний испытываемых конструкций оказываются нелинейными, что затрудняет анализ результатов испытаний. Такие задачи проще исследовать при испытании моделей.

Испытания моделей обычно совмещают со статическими испытаниями и проводят вплоть до разрушения модели.

Модель разрушения рассчитывают на основании теории подобия с учётом сил тяжести и инерции. Условия динамического подобия при упругой работе модели определяются по формулам:

для сил тяжести

(4)



для сил инерции

(5)



где - ускорение свободного падения;



- плотность мате­риала;



- масштаб напряжений:

(6)



-линейная деформация;



- масштаб ускорений:



(7)



- вре­мя.



Переход от натурной конструкции к модели, осущест­вляется введением системы масштабов преобразования:

и т. д.



Моделирование сил инерции осуществляется путем укладки или подвешивания в определенных точках модели дополнительных грузов, имитирующих действие объемных сил. Последние могут быть получены и при центробежном моделировании. Для этого маломасштабную модель помещают в центрифугу, где в зависимости от скорости её вращения создается соответствующая сила инерции: Учитывая, что поле центробежных сил не тождественно полю сил тяжести, размеры модели и центрифуги задают так, чтобы уменьшить погрешности неоднородного силового поля.

И.С. Инютиным (БелИИЖТ) разработан метод объемного моделирования массовых сил с «замораживанием» деформаций после нагружения. При этом в качестве силового поля для нагружения объектов или их моделей, изготовленных из магнитодиэлектриков, используются пондеромоторные (механические) силы постоянных электромагнитных полей, а в качестве устройств для измерения деформаций – тензорезисторы с малыми базами, которые в зависимости от целей исследований заделывают внутрь тела объекта или приклеивают на его поверхность.

Теория динамического расчета строительных конструкций, работающих в податливой среде, разработана В.Ш. Барбакадзе. Методика мелкомасштабного моделирования динамических явлений разработана И.С. Шейниным.

Испытания крупномасштабных моделей в натуральной величины проводят с использованием вибрационных машин, с помощью которых испытывают натурные фрагменты узлов и соединений отдельных элементов, а затем и сооружение в целом. Принцип поэлементного моделирования даёт возможность изучить работу отдельных наиболее ответственных узлов и соединений новой конструкции, определить их деформативность и несущую способность, чтобы использовать полученные результаты при испытании крупномасштабной модели или натурной конструкции.



Для динамических испытаний разработаны различные по мощности и характеристикам вибрационные машины, которые позволяют развивать инерционные горизонтальные силы, как в моделях, так и в натурных объектах – построенных зданиях, соответствующие сейсмическим воздействиям до 9 баллов. Для уменьшения влияния дополнительных форм колебаний вибромашину закрепляют вблизи центра тяжести модели. Размещение остальных вибраторов зависит от целей и задач испытания, характера взаимодействия модели с основанием, податливости стыков и связей и т. д.

Динамические испытания часто совмещают со статическими. Их сочетание позволяет:

* более полно исследовать напряжённо-деформированное состояние;
* построить эпюры изгибающих моментов, нормальных и поперечных сил при статических загружениях;
* установить характер изменения частот и амплитуд колебаний при динамических загружениях;
* уточнить влияние инерционных сил на несущую способность модели.

1. **Задачи, решаемые испытанием моделей**

На физических моделях можно решать большое количество строительных задач, а именно:

* определение несущей способности и схемы разрушения;
* жесткости, устойчивости и выносливости отдельных элементов и модели в целом;
* определение силовых воздействий на сооружения от ветра, водяных волн, давления сыпучих тел, взрыва и др.;
* определение напряжённо-деформированного состояния конструкций и сооружений как надземных, так и подземных;
* определение частот, амплитуд и форм колебаний сооружений при заданных динамических, сейсмических и взрывных воздействиях;
* влияние объемных сил на напряженное состояние и сопряжение с грунтом основания;
* моделирование взрывов и многие другие задачи.

1. **ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ**

Многие строительные конструкции (в том числе земляное полотно) воспринимают динамические воздействия, сообщающие их массам ускорения и вызывающие появление инерционных сил и колебаний. К динамическим воздействиям относятся нагрузки, быстро изменяющие свою величину, направление или место приложения на конструкции.

Классификация динамических нагрузок очень разнообразна. Динамические нагрузки могут быть детерминированными (определёнными, неслучайными) и случайными. Большая часть детерминированных нагрузок описывается законом их изменения во времени. Такие нагрузки возникают при работе механизмов с неуравновешенными массами, электродвигателей и генераторов, вентиляторов и молотов, кривошипно-шатунных механизмов и др. Для случайных нагрузок до проведения испытаний нельзя предсказать их конкретный характер, хотя при наборе обширной статистической информации можно выявить их определённые вероятностные характеристики.

При рассмотрении стационарных случайных нагрузок, которыми в частности являются ветровые нагрузки на высотные здания и сооружения, волновые нагрузки на причальные сооружения, необходимо знать либо функцию спектральной плотности , либо корреляционную функцию , которые связаны между собой прямым и обратным преобразованием Фурье



,

(8)



(9)



Динамическая нагрузка может быть неподвижной и подвижной. К неподвижной - относятся воздействия на сооружения стационарно установленного оборудования, подвижной - воздействия на строительные конструкции кранов, электрокаров, подвижного состава, а также перемещение людей.

По характеру изменения нагрузок во времени различают непериодические, импульсные, периодические, гармонические. Особый характер носит ударная нагрузка.

Примерами непериодической нагрузки может являться воздействие на строительные конструкции взрывных нагрузок, обусловленных взрывом взрывчатых веществ, горением газовой смеси и т. д. В отдельных случаях такие нагрузки могут действовать относительно короткий промежуток времени. В этом случае становится несущественным характер распределения нагрузки во времени. Если время действия нагрузки подчинено неравенству , где - наибольший период собственных колебаний конструкции,, то эффект оценивается значением величины действующего импульса , которая определяется выражением



.

(10)



Под ударной нагрузкой понимается воздействие на строительную конструкцию другой массы, когда необходи­мо учитывать взаимодействие двух, а иногда и более, соударяемых тел. В этом случае иногда возникает необходимость изучения местных явлений, протекающих вблизи точек соприкосновения, а также закономерностей распространения волновых колебаний.

**3.1. ИСПЫТАНИЯ НАТУРНЫХ СООРУЖЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ**

При обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений, на конструкции которых действует динамическая нагрузка, экспериментальные исследования в основном проводятся в условиях действия этой нагрузки. Задача исследования сводится к регистрации параметров характеризующих работу конструкций. Сравнение полученных значений динамических деформаций и перемещений с нормативными значениями позволяет проверить условия эксплуатации.

Динамические колебания строительных конструкций оказывают неблагоприятное влияние не только на прочностные характеристики конструкции, но и на людей и технологические процессы.

Нормативные документы устанавливают предельно допустимые значения параметров динамических колебаний (вибраций) вредных для человека. Известно, что колебания оказывают на человека отрицательное психологическое воздействие и могут вызвать тяжёлые физиологические расстройства (виброболезнь). Основными критериями оценки вибраций являются их амплитуды и частоты, а так же продолжительность воздействия динамических колебаний на организм человека.

В электронной, оптико-механической и машиностроительной промышленности некоторые технологические операции производятся под микроскопом с точностью до долей микрона. В этих случаях уровни допустимых вибраций строго ограничены, и для их соблюдения предусматривают разработку специальных мероприятий по уменьшению или устранению колебаний.

К типичным нагрузкам, при которых проводятся динамические испытания эксплуатационной нагрузкой, относятся:

* вибрационная нагрузка, создаваемая работой механизмов с неуравновешенными массами, например, от компрессоров, вибростолов, грохотов, станков и др.;
* динамическая составляющая ветровой нагрузки, которая оказывает существенное воздействие на высотные сооружения (мачты, дымовые трубы и др.) и многоэтажные здания высотой более 40 м;
* ударная нагрузка от действия копров, молотов и др.;
* подвижная нагрузка от транспорта, кранов и др.

**3.2. ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ ИСКУССТВЕННО СОЗДАВАЕМОЙ ВИБРАЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ**

В процессе вибрационных испытаний деформации и перемещения в различных точках конструкции изменяются во времени по гармоническому закону. Различают испытания в режиме собственных и вынужденных колебаний.

Испытания в режиме собственных колебаний в натурных условиях воспроизводится значительно проще. Однако использование результатов таких испытаний ограничивается возможностью создания и исследования одной, в лучшем случае, двух форм собственных колебаний, хотя для решения многих практических задач эта информация является вполне достаточной.

Испытания в режиме вынужденных колебаний сложнее в исполнении, но ценнее, информативнее по своим результатам. Вынужденные колебания создаются в околорезонансных режимах и обеспечивают исследование различных форм колебаний, в том числе пространственных. Характерной особенностью резонансных испытаний является возможность создания больших динамических деформаций и перемещений в элементах конструкции.

При натурных вибрационных испытаниях определяют следующие основные параметры: форму, частоту и декремент колебаний конструкции. При исследовании влияния вибраций на прочностные свойства материалов, элементов и соединений в качестве исходных параметров динамической нагрузки используют коэффициент асимметрии цикла, среднее и амплитудное значение цикла, выраженное в терминах номинальных напряжений или реальных с учётом их концентрации.

Поведение конструкции характеризуется большим числом форм колебаний, так как реальные системы обладают бесконечно большим числом степеней свободы. Однако практическое значение имеют первые две, три формы, отвечающие по своим частотам характеристикам действующих нагрузок. На рисунке 6 показаны виброграммы, полученные в ходе резонансных испытаний с помощью вибромашины, установленной в



а)



б)

Рис. 6. Виброграммы динамических испытаний статически определимой балки на двух опорах

четверти пролёта статически определимой балки на двух опорах. Различные формы колебаний наблюдаются при совпадении частоты колебаний возмущающей силы с частотой собственных колебаний балки по соответствующей форме. Для изгибаемой шарнирно опёртой балки отношение значений спектра частот соответствует показателю , где - номер формы.



Частота колебаний связана с периодом колебаний зависимостью:

(11)



где - частота колебаний в Гц;



Т - период колебаний в сек.

В ходе вибрационных испытаний решаются следующие задачи:

* определение динамического коэффициента для воздействий с известными динамическими характеристиками;
* определение состояния несущих конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений;
* определение упругих динамических характеристик строительных материалов;
* неразрушающий контроль качества строительных изделий;
* определение влияния циклического загружения на снижение прочностных характеристик материалов и конструкций (предел выносливости, малоцикловая усталость).

Испытания по определению динамического коэффициента установившихся вынужденных колебаний производятся в случаях, когда на конструкцию предполагается установка агрегатов, создающих динамические воздействия. В паспорте агрегата указываются динамические характеристики: масса, частотные характеристики и др. Для расчёта динамического коэффициента требуется дополнительно определить значения собственных частот несущих элементов и соответствующих частотам декрементов колебаний. Расчёт конструкций на вибрационную нагрузку проводится с целью определения величины динамических перемещений и деформаций и последующей проверки соблюдения условий нормальной эксплуатации.

Динамический коэффициент показывает, во сколько раз динамические перемещения и напряжения в системе с одной степенью свободы отличаются от статических перемещений и напряжений, рассчитанных на действие амплитудного значения динамической силы. Коэффициент динамичности можно определить по следующей формуле:

(12)



где - декремент собственных колебаний;



(13)



здесь - круговая частота возмущающей силы;



- круговая частота собственных колебаний.



Для определения коэффициента динамичности необходимо найти с помощью вибрационных испытаний частоту и декремент собственных колебаний. Следует отметить, что значение декремента колебаний зависит от частоты и амплитуды колебаний. Поэтому, динамические испытания, необходимо проводить в диапазоне резонансной частоты, когда частоты вынужденных и собственных колебаний максимально близки.

По результатам динамических испытаний проводится расчёт динамических напряжений и перемещений конструкций на действие вибрационной нагрузки от устанавливаемого оборудования. Если рассчитанные параметры превысят допускаемые, необходимо предусмотреть мероприятия по повышению динамических параметров конструкции.

Снизить уровень вибрации конструкции можно двумя способами:

* изменить параметры динамической нагрузки на конструкцию;
* изменить параметры самой конструкции.

Для реализации первого способа существуют следующие возможности:

* изменение частоты динамической нагрузки;
* изменение места установки агрегата на конструкции (при вертикальной динамической нагрузке рекомендуется передвинуть агрегат как можно ближе к опорам плит перекрытия, при горизонтальной – вдоль балок перекрытия);
* динамическая балансировка вращающихся частей механизма со смещённым центром массы относительно оси вращения (выполняется закреплением дополнительной массы на вращающейся части для полного или частичного погашения вибрации);
* активная виброизоляция агрегата (уменьшение динамической составляющей воздействия на перекрытие).

Чтобы реализовать второй способ необходимо изменить параметры конструкции. Изменения проводятся с учётом влияния этих параметров на частоту собственных колебаний и вывода системы из области резонанса при воздействии гармонической динамической нагрузки. Для реализации этого способа существуют следующие возможности:

* изменение конструктивной схемы конструкции: введение дополнительных связей; пересмотр конструктивного решения опорных узлов; уменьшение пролёта с помощью установки дополнительных опор и др.;
* изменение жёсткости конструкции за счёт изменения её поперечного сечения;
* устройство постамента под агрегат, который в зависимости от необходимого уменьшения или увеличения частоты может быть выполнен массивным без прочной связи с конструкцией, лёгким и жёстким, прочно прикреплённым к перекрытию;
* установка различных амортизационных устройств.

При разработке конструктивных решений по уменьшению вибрационных воздействий необходимо учитывать, что уменьшение частоты собственных колебаний конструкции всегда сопровождается увеличением прогибов и напряжений в ней, вызванных статической нагрузкой. В связи с этим требуется проведение дополнительного статического расчёта.

Резонансные (вибрационные) испытания широко используются для оценки состояния отдельных конструкций (элементов конструкции) эксплуатируемых зданий и сооружений. Этот метод контроля позволяет устанавливать частоты для первых форм колебаний конструкции и определять соответствующие декременты колебаний. Эти параметры используются в качестве показателей степени повреждения конструкций. Эта задача особенно актуальна для зданий и сооружений, подверженных сейсмическим нагрузкам.

Всемирные исследования в этой области показали, что динамические параметры пространственной конструкции здания или сооружения очень чувствительны к повреждениям, вызванным сейсмической нагрузкой. В испытаниях, проведённых на реальных объектах и крупномасштабных моделях, были установлены количественные соотношения между уровнем сейсмической нагрузки и динамическими параметрами конструкции, получившей повреждения, причём сейсмическая нагрузка моделировалась вибрационным воздействием.

В процессе отработки методики было доказано, что характер повреждений при сейсмическом и вибрационном воздействии идентичен. Кроме того, было установлено, что перемещения и внутренние усилия в конструкции при возмущениях, передающихся через грунт и в случае возбуждения колебаний в уровне перекрытия, имеют практически идентичный конечный результат. С методической точки зрения эти результаты чрезвычайно важны, так как динамическое нагружение в уровне перекрытия эффективнее и значительно проще осуществимое.

Динамические испытания строительных конструкций в режиме собственных или вынужденных колебаний являются одним из составных элементов комплексного неразрушающего контроля качества готовой продукции. Наиболее широкое применение получили вибрационные испытания на предприятиях изготавливающих сборный железобетон. Испытания проводятся для контроля качества изгибаемых изделий, в том числе и предварительно напряжённых.

1. **ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ**

Испытание конструкции динамической нагрузкой является более сложным, чем испытание статической нагрузкой. Эта сложность заключается в том, что испытательная нагрузка и испытательные приборы, применяемые для записи деформаций, представляют собой в большей своей части механизмы, приводимые в движение во время испытания. Причем требуется, чтобы они работали синхронно и четко, как один общий агрегат. Необходимо составить подробный план проведения испытания, в котором надо предусмотреть все детали, даже имеющие второстепенное значение.

Обработку результатов испытания желательно разделить на две части:

1) полевую обработку результатов для оценки правильности протекания эксперимента и для своевременного устранения возможных неполадок;

2) камеральную обработку результатов испытания с вычислением всех намеченных к определению величин: амплитуд и частот колебаний, ускорений, напряжений, динамических коэффициентов и т. п.

Рассмотрим некоторые случаи проведения испытаний сооружений динамической нагрузкой.

**Экспериментальное определение частоты свободных колебаний конструкции**

Определение частоты свободных колебаний имеет большое значение для правильной эксплуатации исследуемой конструкции. Зная частоту собственных колебаний конструкции, можно решить вопрос о допустимости установки на исследуемом объекте какого-либо агрегата, создающего при его движении возмущающую нагрузку с определенной частотой, или же выяснить, какой агрегат из ранее установленных создает резонанс, и найти возможные пути ликвидации этого явление.

Определение частоты свободных колебаний конструкции или ее элемента, можно осуществить двумя способами.

Первый способ. Конструкция подвергается отдельному удару, который вызовет ее затухающие (свободные) колебания, и на установленном заранее вибрографе или осциллографе записать виброграмму. Имея запись колебаний и времени, можно подсчитать частоту колебаний исследуемой конструкции. При эксперименте фотоленту прибора следует пускать с достаточно большой скоростью и для подсчета частоты колебаний брать длинный участок записи, что обеспечит условия для наиболее точного определения частоты.

При обработке виброграммы первые две-три полуволны исключаются из рассмотрения, так как на них отражается непосредственное действие удар. Определение числа колебаний рекомендуется вести на остальной части виброграммы, где колебания имеют более установившийся характер. Следует иметь в виду, что скорость движения ленты переменная, поэтому необходимо следить за показаниями отметчика времени.

Второй способ. На испытываемом элементе устанавливается вибромашина. Затем приводят её в действие, увеличивая ступенями число оборотов. При каждой ступени оборотов, выждав, пока колебания конструкции примут стабильный характер, делают необходимые записи самопишущими приборами (вибрографом, динамическим прогибомером или осциллографом).

Когда частота возмущающей силы вибромашины совпадает с частотой собственных свободных колебаний конструкции, образуется резонанс, который резко выделится на виброграмме возросшими размерами амплитуд. Полезно одновременно изме­рить частоту вращения вибромашины с помощью тахометра или частотомера, что даст возможность проверить также правильность показаний отметчика времени и более уверенно вычислить частоту собственных колебаний.

**4.2. Определение динамических коэффициентов**

Динамические коэффициенты определяются, как правило, для тех конструкций, по которым перемещаются подвижные нагрузки, например железнодорожные составы, автомобили, мостовые краны и т. п. и необходимы для расчета подобных конструкций. Определяемые расчетным путем напряжения и деформации от динамических нагрузок суммируются с напряжениями и деформациями от статических нагрузок.

При проектировании динамический коэффициент определяют теоретически с рядом допущений или же используют динамические коэффициенты, полученные экспериментально для аналогичных сооружений, ранее построенных. Для мостов такие определения динамических коэффициентов ведутся много лет и накоплен достаточно богатый опытный материал.

При экспериментальном определении динамического коэффициента его значение выводится из соотношения

,

(14)



где - максимальный прогиб балочной конструкции при мед­ленном проходе нагрузки (статическое загружение);



- максимальный прогиб при движении нагрузки со скоростью, вызывающей наибольшие колебания конструкции (динамическое загружение).



Такие два загружения можно легко осуществить для нагрузок, движущихся по рельсам (локомотивы, трамваи, подъёмные краны и т. п.).

При экспериментальном определении динамического коэффициента для автодорожных мостов, где повторить идентичное загружение почти не представляется возможным, подвижную нагрузку пропускают по мосту не дважды, а один раз со скоростью, вызывающей наибольшие колебания конструкции, и записывают виброграмму или осциллограмму прогибов (рис. 7). Наибольшая ордината даст величину максимального динамического про­иба . Для получения прогиба от статической нагрузки необходимо на записанной кривой провести среднюю линию, делящую пополам размах вибраций; эта кривая представляет собой диаграмму статических прогибов, и её наибольшая ордината принимается для определения динамического коэффициента.



**Определение напряжений в элементах конструкции при действии динамической нагрузки**

Напряжения в элементе конструкции при действии динамической нагрузки состоят из напряжения от статической нагрузки, включая собственный вес элемента, сложенного с динамическим напряжением вызванным вибрацией:



В этом случае учитываются только те динамические напряжения, которые имеют одинаковый знак с напряжениями от статической нагрузки. Например, если рассматривается изгибаемая балка, то к напряжениям от статической нагрузки прибавляются напряжения, вызываемые динамической нагрузкой, при деформации балки в сторону статического прогиба.

Для определения необходимо вычислить инерционную силу, действующую на исследуемый элемент. Инерционная сила равна массе, умноженной на ускорение:



.



Ускорение можно измерить акселерометром или получить из виброграммы, пользуясь формулой:

,



где - период колебания;



- наибольшая амплитуда;



- ускорение элемента конструкции. Отсюда



Отсюда

,



где - частота колебаний элемента.



Во всех точках, где требуется определить ускорение, надо установить акселерометры, вибрографы, динамические прогибомеры или прогибомеры с проволочными датчиками и записать виброграммы или осциллограммы.

При действии на элемент осевой силы динамическое напряжение

.



В случае действия на балку на двух шарнирных опорах со­средоточенной силы , приложенной в середине пролета, динамическое напряжение равно:



.



Если вибрирует балка на двух шарнирных опорах под действием собственного веса и равномерно распределенной нагрузки, то динамическое напряжение можно вычислить по формуле:

.



где - масса, приходящаяся на единицу длины балки;



- ускорение, определенное на середине пролета балки.



При вибрации балки, несущей равномерно распределенную нагрузку и сосредоточенный груз посередине пролета, динамическое напряжение найдется по формуле

/



Когда вибрирующая балка несет сложную нагрузку, состоящую из ряда сосредоточенных сил и сплошных неравномерных нагрузок, теоретическое вычисление приведенной массы которых представляет некоторые затруднения, рекомендуется следующий прием. Балка вместе с приходящейся на нее нагрузкой разбивается на ряд участков, в пределах которых просто вычислить величины масс каждого участка. В центрах каждого участка устанавливаются акселерометры, вибрографы или прогибомеры с петлевыми тензорезисторами и записываются осциллограммы или виброграммы, по которым определяются ускорения . Перемножив массы на соответствующие ускорения, находят инерционные силы , действующие в каждом участке балки. Зная величины инерционных сил и точки их приложения, принимаемые в центрах отдельных участков, можно вычислить изгибающие моменты, действующие на балку, и определить динамические напряжения в любом сечении по ее пролету.



Определение напряжений в конструкции от динамической нагрузки можно также произвести с помощью петлевых тензорезисторов, наклеенных в тех местах, где необходимо найти эти напряжения, и просуммировать их с напряжениями от статической нагрузки. При таком определении напряжений надо знать величину модуля упругости материала конструкции.

Вибрационные колебания конструкции непрерывно меняют величину суммарного напряжения. В большинстве случаев знаки напряжений остаются постоянными, так как напряжения от статической нагрузки превалируют над напряжениями от динамической нагрузки. Однако возможны случаи, когда суммы напряжений от статической и динамической нагрузок будут переходить через нуль и напряжения станут знакопеременными. В том и другом случаях возможно возникновение усталости материала, причем во втором случае, когда имеются знакопеременные напряжения, явление усталости проявляется в большей степени, чем в первом.

Для возникновения усталости материала необходимо большое число циклов изменений напряжений, исчисляемое сотнями ты­сяч и миллионами.

**4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА. "ДИНАМИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНОЙ БАЛКИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ"**

**4.1. Виброизмерительные приборы**

* + 1. **Сведения о теории и классификация приборов**

Динамические испытания строительных конструкций отличаются от статических тем, что величина и направление нагрузки не остаются постоянными на этапах загружения, они сравнительно быстро изменяются во времени и вызывают линейные и угловые перемещения.

Параметрами линейной вибрации являются; перемещения, скорость, ускорения и резкость (первая производная от ускорения).

К параметрам угловой вибрации относятся: угол поворота, угловая скорость, угловое ускорение, угловая резкость.

Параметрами обеих видов вибрации служат: фаза, частота и коэффициент нелинейных искажений. Для их измерения необходима внешняя неподвижная система координат, относительно которой крепятся виброизмерительные приборы, фиксирующие абсолютные перемещения. Если создание такой системы затруднительно, применяют подвижную систе­му отсчета и вибропреобразователи инерционного действия. Основным элементом вибропреобразователя является инерционная масса m, соеди­ненная с корпусом прибора пружиной жесткостью к и демпфирующим элементом с коэффициентом успокоения с (рис. 2). Корпус прибора со­вершает колебания у вместе с исследуемой конструкцией. Масса перемещается относительно корпуса прибора на величину z, которая может быть записана на вращающемся с заданной скоростью барабане. Пе­ремещение пружины — х. Следовательно, z = х + у.

Для определения закономерностей движения системы запишем дифференциальное уравнение движения массы m по времени t:

(14)



Подставив значение z, получим

(15)

,



где точки над буквами обознача­ют дифференцирование по времени.

Для анализа работы вибропреобразователя введем в уравнение (15) следующие обозначения:

- частота собственных колебаний системы;



- коэффициент затуха­ния.



Тогда .

(16)



Если в приборе нет демпфирующего элемента и частота собственных колебаний незначительная , то. Пренебрегая произвольными постоянными, получим , и показания прибора будут соответствовать действительным перемещениям испытываемой конструкции. Такой прибор называется виброметром.



Инерционная масса (или сейсмомасса) при податливой пружине практически не меняет своего положения в пространстве.

Если при низкой частоте собственных колебаний в прибор ввести хорошо гасящий колебания демпфирующий элемент, то из уравнения (16), пренебрегая первым и третьим слагаемыми, получим , откуда . Такой прибор служит для определения скорости колебаний и его называют виброметром скорости (вибровелосиметром).



При отсутствии демпфера и высокий частоте колебаний перемещение массы пропорционально ускорению; и такой прибор является виброметром ускорения (виброакселерометром).



Виброизмерительные приборы можно разделить на две основные группы: контактные и дистанционные (рис.8). К контактным приборам относятся механические и оптические приборы, применяемые чаще при освидетельствовании конструкций для приближённого определения параметров колебаний (амплитуд и частот). Аналогично назначение и оптических приборов. Более точные измерения могут быть получены приборами с регистрацией показаний на специальной ленте или бумаге ручным вибрографом или вибрографом Гейгера.

Бесспорными преимуществами обладают дистанционно работающие вибропреобразователи, устанавливаемые на испытываемой конструкции (первичные приборы), сигнал которых записывается вторичными прибо­рами, установленными на определенном расстоянии от испытываемой конструкции.

Процесс измерения динамических характеристик испытываемой кон­струкции обычно состоит из следующих операций:

* преобразование измеряемой величины в другую физическую вели­чину более удобную для измерения;
  + измерение вторичной физической величины;
  + регистрация измерений;
  + обработка результатов измерений.

**4.1.2. Характеристики используемых приборов**

**4.1.2.1. Вибромарка**

Вибромарка инженера Р.И. Аронова (рис. 7) служит для измерения вибрации с постоянной амплитудой. Принцип действия прибора основан на оптическом эффекте человеческого глаза, т. е. на слитности восприятий явлений, чередующихся быстрее 7 раз в 1 секунду. Следовательно, вибромарка применима при колебаниях с частотой 17 циклов в секунду с малой амплитудой или 8 циклов в секунду при большей амплитуде, так как при меньшем числе колебаний наблюдатель не может надёжно видеть фигуру возникающего клина. Чем больше амплитуда вибрации, тем ближе к основанию расположится остриё клина (рис. 9). Таким образом, вибромарка может быть протарирована как приспособление для измерения амплитуд.

Рис. 9. Общий вид вибромарки

Вибромарка вычерчивается на бумаге в виде острого угла с основанием b=5...20 мм и L=50...200 мм и наклеивается на поверхность конструкции, размах колебаний которой требуется определить. Колебания совершаются в направлении стрелок (Рис. 10). Наблюдатель может измерить расстояние l до пересечения сдвоенных треугольников, а затем определить амплитуду колебаний по формуле

.

(17)



Рис. 10. Показания вибромарки размаха колебания конструкции

2а

l

b

L

**4.1.2.2. Ручной виброграф**

Для записи колебаний высокой частоты могут с успехом применяться ручные вибрографы. Среди них нашел большое распространение ручной виброграф марки ВР-1, который при записи виброграммы удерживается непосредственно в руках экспериментатора и не требует никакой подставки.

Виброграф (рис. 11) состоит из корпуса 1, в который запрессована трубка 2. Внутри трубки расположен стержень 3 с выступающим наружу наконечником 4. Верхний конец стержня проходит в корпус и упирается своим наконечником в рычаг 5, оттягиваемый книзу концом спиральной пружины 6, прикрепленной к поводку 7. Поводок может передвигаться вдоль трубки и закрепляться в желаемом положении двумя винтами 8. Передвигая по­водок книзу, можно увеличить давление пружины на стержень. Чтобы давление пружины не вытолкнуло стержень вниз, в верхней его части, под наконечником насажена сферическая шайбочка 9, упирающаяся в соответствующее гнездо.

На свободном конце рычага имеется острие, которое производит запись виброграммы путем царапания воскового слоя, покрывающего бумажную ленту 10 шириной 24 мм.  
На этой же ленте рядом с виброграммой наконечник 11 (отметчик времени) делает отметку времени в виде черточек, наносимых с интервалом в 1 секунду. Лентопротяжный механизм приводится в действие часовой пружиной 12, заводимой ключом 13.

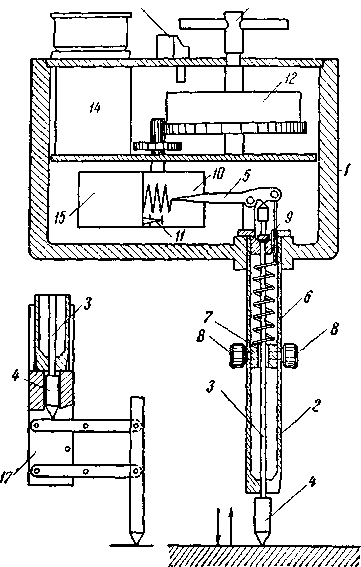


Рис. 11. Ручной виброграф ВР-1

***16***

***13***

Отметчик времени может работать от собственной батареи, помещающейся в отсеке 14, или от внешнего источника электрического тока, включаемого в соответствующее штепсельное гнездо. Реле отметчика времени, и приводное устройство помещены в отсеке 15. Ручка 16 для приведения вибрографа в действие расположена на крышке корпуса.

Общие габариты прибора: 80 X 130X230 мм. Вес прибора с рычажным приспособлением равен 1.7 кг. Амплитуды колебаний от 0.05 до 1.5 мм записываются с шестикратным увеличением; амплитуды колебаний от 1, 5 до 6 мм записываются в натуральную величину или с двукратным увеличением, для чего на конец трубки надевается специальное рычажное приспособление 17, состоящее из шарнирного параллелограмма, в верхний стержень которого упирается наконечник 4.

Для записи амплитуд и марок времени следует наконечник 4 или рычажное приспособление 17 привести в соприкосновение с вибрирующим элементом конструкции, ориентировав стержень 3 по направлению колебаний исследуемого элемента, и включить виброграф, повернув ручку 16. При самом сильном натяжении пружины стержень 3 с наконечником 4 может следовать за элементом, имеющим ускорение до 20 g.

Корпус прибора со всеми относящимися к нему частями образует инертную массу, которая удерживается руками экспериментатора.

Ручной виброграф записывает виброграмму с амплитудами от 0,05 до 6 мм при частотах от 5 до 100 Гц.

Недостатком ручного вибрографа является сравнительно невысокая точность (до 8%), а так же ограниченные параметры измеряемых амплитуд и частот.

**4.1.2.3.Светолучевой осциллограф**

Светолучевой осциллограф предназначен для визуального наблюдения и синхронной записи на фотоленте функций одной или нескольких (до 12) исследуемых величин времени, называемых осциллограммами. Это обеспечивается набором гальванометров с различными собственными частотами и широким диапазоном скоростей движения фотоленты.

Для записи быстро меняющихся напряжений или деформаций конструкции с успехом применяются проволочные тензорезисторы с записью осциллограммы (виброграммы) на осциллографе. Тензорезисторы для динамических испытаний применяются такие же, как и для статических, но со значительно повышенным омическим сопротивлением до 500—1000 Ом, а иногда и до 2000 Ом.

При записи осциллограмм приходится усиливать ток, подаваемый про­волочными датчиками на осциллограф.

Взаимное расположение отдельных частей установки показано на рисунке 12. Если источником питания является переменный ток, то приборы соединяются в последовательности, показанной на рисунке: к мостику Уитстона 1 подключается усилитель переменного тока 2, к усилителю подключается выпрямитель 3, а к последнему присоединяется осциллограф 4. Усилитель совместно с выпрямителем образуют тензометрический усилитель.

Осциллографы разделяются на инерционные (шлейфовые) - для регистрации частот до 1000 Гц и безинерционные (катодные) - для частот выше 1000 Гц. Наиболее распространены шлейфовые осциллографы.

Шлейфовые осциллографы (светолучевые). Основными частями осциллографа являются измерительный шлейф и устройство для визуального наблюдения и фотозаписи осциллограмм.

Осциллографы могут быть одношлейфовыми и многошлейфовыми.

Шлейф (вибратор) осциллографа (рис. 13) состоит из магнита 1, выполненного в виде цилиндрической подковы, между полюсами которого расположена вертикальная проволочная петля 2, натягиваемая спиральной пружиной 3. На петле закреплено легкое зеркальце 4 размерами 1,0X1,0x0,05 мм. К концам петли присоединены провода от петлевого тензорезистора, наклеенного на исследуемый объект. Зеркальце находится в постоянном магнитном поле, создаваемом магнитом. При прохождении по петле тока, посылаемого тензорезистором, вокруг петли создаётся свое магнитное поле, вступающее во взаимодействие с полем магнита и вызывающее закручивание петли, и поворот зеркальца. Величина и направление угла поворота зеркальца зависят от силы и направления тока, проходящего через петлю. На зеркальце направляется луч лампочки, пропущенный через соответствующие линзы, и при повороте зеркальца этот луч отклоняется на угол, тем больший, чем более сильный ток проходит через датчик и петлю. Луч света, посылаемый зеркальцем, направляется на движущуюся фотопленку и записывает на ней осциллограмму.

Рассмотрим оптическую схему восьмишлейфового универсального осциллографа типа Н 700 (рис. 14). Лампочка 1 испускает пучок света, проходящий через конденсор 2 и диафрагму 3 в виде пластинки с восемью узкими вертикальными щелями, разбивающими общий световой параллельный поток света на восемь плоских пучков в виде световых пластинок.

В дальнейшем описании и на чертеже рассматривается трансформация лишь одного плоского пучка света, так как все остальные семь пучков трансформируются аналогично показанному на схеме.

Каждый плоский пучок света попадает на свое вертикальное поворотное зеркало 4. Эти зеркала установлены таким образом, что луч света, отразившись от зеркала 5, а затем от зеркала 8, попадает через линзу шлейфа 7 на его зеркало 6, укрепленное на проволочной петле; на два шлейфа, расположенных в середине, пучки света проходят, минуя зеркала 8. Луч света, отражаемый от зеркала 6, проходит снова через линзу 7 и, отра­жаясь от зеркала 8, попадает частично на зеркало 9 и частично на отрицательную сферическую линзу 16. Часть светового луча, попавшего на зеркало 9, отражается от него, а затем от зеркала 10 и, пройдя цилиндрическую линзу 11, фокусируется на фотоленту 12. Другая часть светового луча проходит через отрицательную сферическую линзу 16, цилиндрическую линзу 15, отражается от зеркальных граней вращающегося барабана 14 и попадает на матовый стеклянный экран 13.

Для получения масштаба времени на фотоленте, предусмотрен отметчик времени, представляющий собой микрофонный зуммер, подвижная часть которого совершает колебания определенной частоты, записываемые на той же ленте. Отметчик времени устанавливается взамен одного из шлейфов в первом гнезде, в котором для этого предусмотрены соответствующие контактные стержни. Отметчик времени регистрирует частоту 500 или 50 Гц с точностью до ± 1 %.

С помощью осциллографа можно записать:

* фибровые деформации;
* деформации при изгибе (прогибы);
* ускорения и другие характеристики.

На одной ленте можно производить одновременную запись нескольких осциллограмм, принимаемых с разных шлейфов. Скорость движения ленты можно регулировать от 1 до 5000 мм в секунду.

Тензометрический усилитель предназначен для усиления сигналов от тензорезисторов, включенных в мостовую схему (рис. 12). Частота измеряемого процесса в 5 - 7 раз ниже и находиться в пределах 0 - 7000 Гц.

Усилитель состоит из автономного или встро­енного блока питания, нескольких однотипных блоков, генератора несущей частоты, указателя выходного тока, тумблеров, ручек и шлицев включения, настройки, градуировки и балансировки моста. Выходы усилителя рассчитаны на подключение гальванометров (шлейфов) светолучевых осциллографов.

Принцип работы усилителей заключается в том, что рабочий тензорезистор, наклеенный на конструкцию, подключается к прибору и предварительно балансируется при ненагруженном состоянии конструкции. Стрелка гальванометра устанавливается на ноль. При нагружении конструкции вследствие деформации тензорезистор изменяет свое сопро­тивление, происходит разбаланс моста и появляется напряжение несущей частоты, которое усиливается и подается на фазочувствительный детектор с фоном несущей частоты. Полученный на выходе сигнал пропорционален измеряемой деформации. Этот сигнал подается на миллиамперметр и гальванометр осциллографа. В каждом блоке усилителя имеется переключатель для ступенчатого измерения коэффициента усиления. усилителю, кроме гальванометров светолучевых осциллографов, могут быть подключены электронные осциллографы и магнитографы.

**4.2. Цели и задачи работы**

Целью работы является знакомство с методикой определения основных параметров колебательного процесса (частоты вынужденных колебаний, собственная частота, явление резонанса).

Задачи осуществляемые работой:

1. Познакомиться с устройствами для динамических испытаний.
2. Познакомиться с приборами для определения динамических характеристик.
3. Изучить методику определения динамических напряжений в несущих строительных конструкциях.
4. Определить теоретическим расчётом собственную частоту балки и сравнить её с результатами, полученными из опыта.
5. Определить погрешность эксперимента.
6. Составить заключение по результатам испытания.

**ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ**

1. Стенд для испытаний.
2. Стальная шарнирно опёртая балка равного сопротивления.
3. Штучные грузы.
4. Вибромарка.
5. Измерительная консоль с тензорезисторами.
6. Тензостанция.
7. Осциллограф.
8. Индикатор часового типа (мессура).
9. Частотомер.
10. Ручной виброграф.
11. Лабораторный трансформатор.
12. Вибромашина.
13. Штангельциркуль.
14. Металлические линейки 1м (ГОСТ 427-56) и 0.5м (ГОСТ 427-75).
15. Калькулятор.

**Техника безопасности при выполнении лабораторной работы**

При проведении лабораторной работы требуется строго соблюдать правила техники безопасности с целью обеспечения полной безопасности участников испытания и не допустить поломок оборудования.

Эти правила предусматривают обязательное проведение мероприятий по обеспечению надёжного заземления корпусов всех электрических приборов и инструментов.

Подготовка к лабораторной работе производится соответствующим персоналом, утверждённым приказом по университету.

При динамических испытаниях необходимо предусмотреть надёжные страховочные устройства, предохраняющие конструкцию от потери устойчивости и внезапного обрушения. Вращающиеся части вибромашины должны быть закрыты защитными кожухами, а к работающей вибромашине запрещается приближаться на расстояние менее 1.5 м.

Измерительные приборы закрепляют на испытываемой конструкции специальными струбцинами, хомутами и другими приспособлениями. Кроме того, должны быть обеспечены свободный доступ к приборам и хорошая освещённость шкал для наблюдения за их работой на безопасном расстоянии.

По окончании подготовки к лабораторной работе с испытываемой конструкции и из помещения удаляются все посторонние предметы.

Место испытания ограждают. Посторонних лиц к месту испытаний не допускают.

К лабораторной работе допускаются студенты прошедшие соответствующий инструктаж по технике безопасности. При инструктаже следует обратить особое внимание на следующие положения:

* не касаться руками поверхностей станков, оборудования и проводов;
* не нажимать на кнопки и рубильники;
* строго соблюдать установленную соображениями достаточной безопасности дистанцию от испытательного стенда;
* соблюдать последовательность программы проведения испытания;
* своевременно выполнять указания преподавателя и сотрудников лаборатории в процессе проведения работы.

Для всех участников испытаний кроме выполнения правил по технике безопасности необходима повышенная личная внимательность и осторожность, особенно на последних этапах загружения конструкции, когда вынужденные частоты колебаний приближаются к собственным частотам.

Ответственность за выполнением всех мероприятий лежит на преподавателе, проводящем лабораторную работу.

**КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ РАБОТЫ**

В работе испытывается однопролётная стальная балка с грузами G (Рис. 9).

G

G

P

a

a

l/2

l/2

l

h

x

Рис. 8. Испытательная установка

Вибрационная нагрузка создаётся вибромашиной, укреплённой в середине пролёта балки. Частоту колебаний машины с помощью лабораторного автотрансформатора можно изменять произвольно.

Для определения собственной частоты колебаний используется явление резонанса. Вибромашиной последовательно повышаются колебания балки с различной частотой (ступенями). При каждой частоте (ступени) измеряется размах колебаний балки (по прогибам или относительным деформациям). Наибольший размах и будет соответствовать собственной частоте (резонансная частота). Для более точного определения собственной частоты строятся графики "размах - частота".

Размах колебаний определяется по индикатору и шлейфовому осциллографу. Индикатор ставится вблизи опоры, где размах колебаний невелик, и диапазон колебаний стрелки можно фиксировать визуально. При быстрых колебаниях стрелки образуется сектор, соответствующий размаху колебаний.

Осциллограф используется вместе с измерительной консолью из органического стекла (см. рисунок), на которую наклеен тензорезистор . Измерительная консоль устанавливается в среднем сечении балки. Колебания консоли вызывают изменение сопротивления тензорезистора и силы тока, подаваемого на гальванометр. Гальванометр колеблется в магнитном поле вместе с зеркалом, которое отражает луч света на движущуюся фотоплёнку или фотобумагу.



Частота колебаний контролируется с помощью диска с отверстиями, насаженного на ось двигателя вибромашины, лампочки, фотоэлемента и частотомера.

Частота колебаний контролируется с помощью диска с отверстиями, насаженного на ось двигателя вибромашины, лампочки, фотоэлемента и частотомера.

При вращении диска луч света от лампочки периодически прерывается. Прерывистые сигналы от фотоэлемента усиливаются и регистрируются частотомером. Переход от показаний частотомера к частоте возмущающей силы делается по формуле



где: - число отверстий в диске;



- передаточное число (отношение числа оборотов вала двигателя и дисков с эксцентриками).



Измерения заносятся в журнал испытания.

Таблица

Журнал испытания

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | 2 амплитуды | | | Частоты | |
| сту-  пени | По индикатору | По осциллографу | По частотомеру | |  |
| 1 |  |  |  | |  |
| 2 |  |  |  | |  |
| ... |  |  |  | |  |

По результатам измерений строятся графики, по которым определяется собственная частота колебаний балки.

**ϕ** по осциллографу

Индикатор

**ϕ**

А

**ϕ** по индикатору

Осциллограф

Рис. . Графики измерений для определения резонансной частоты

После определения собственной частоты производится контрольная запись колебаний при резонансе ручным вибрографом Вр-1. На специальной ленте вычерчивается график колебаний, и одновременно делаются отметки времени (рис. ).

Рис. . График колебаний балки по вибрографу Вр-1

1 секунда

Теоретическая частота вычисляется по формуле



где - эквивалентная (приведённая) нагрузка на балку



- вес вибромашины, равный 10.8 кг;



- погонный вес балки (принимается по сортаменту);



- относительное расстояние от опор до грузов.



**ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ**

Рекомендуется следующая последовательность.

Первая часть. "Тарирование тензорезисторов":

в журнале зарисовываются схемы тарировочной балки, установки приборов, приложения нагрузки;

производится контроль правильности установки приборов;

снимаются начальные отсчёты с приборов;

прикладывается нагрузка;

снимаются отсчёты с приборов;

производится разгрузка со сверкой результатов;

Вторая часть. "Определение напряженного состояния балки с помощью тензорезисторов":

1. в журнале зарисовываются схемы измерительных приборов, их установки, и размещения;
2. разбивается заданная нагрузка на ступени;
3. производятся замеры необходимых для расчётов геометрических параметров (высота и ширина сечения балки, пролёт, расстояния от опор до сосредоточенных сил, базы тензорезисторов, расстояния между ними);
4. производится контроль правильности установки приборов;
5. снимаются начальные отсчёты с приборов;
6. прикладывается нагрузка первой ступени;
7. снимаются отсчёты с приборов;
8. прикладывается нагрузка второй ступени;
9. снимаются отсчёты с приборов;
10. производится контроль процесса испытания;
11. прикладывается следующая нагрузка с соответствующим контролем и т.д. до последней ступени;
12. производится разгрузка в обратном порядке со сверкой результатов;
13. производится камеральная обработка полученных результатов по последней ступени;
14. пишется заключение по результатам испытания.

Все полученные результаты аккуратно заносятся в соответствующие графы журнала (см. приложение Б). В заключении необходимо сделать вывод и обосновать получившуюся погрешность.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Кинематическая схема измерительных приборов, их краткая характеристика и назначение.

2. Схемы установки приборов (база измерения и цена деления).

3. Формулы для обработки результатов измерений.

1. Схема градуировочного устройства.
2. Заключение по проведении эксперимента.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Из чего состоит тензорезистор, принцип его работы?
2. Начертите схему для измерения показаний тензорезистора.
3. Назовите основные элементы гальванометра.
4. Зачем нужна тензостанция?
5. Как определить амплитуду колебаний с помощью индикатора часового типа?
6. Как определить амплитуду колебаний с помощью шлейфового осциллографа?
7. Перечислить факторы, влияющие на частоту собственных колебаний.
8. Как и чем определяется частота собственных колебаний конструкции?
9. При выполнении каких требований, конструкция считается пригодной под динамическую нагрузку?
10. В чём состоит принцип работы вибромашины?
11. Нарисовать схему вибрографа с инерционной массой (инерционного маятника).
12. Нарисовать схему вибрографа Гейгера с инерционной массой.
13. Из каких узлов состоит шлейфовый осциллограф?
14. В каких случаях испытывают существующие конструкции?
15. Как создаётся ударная нагрузка при испытании (2 способа)?
16. Как создаётся вибрационная нагрузка при испытании?
17. Какой диапазон частот наиболее вреден для человека?
18. Какой диапазон частот наиболее вреден для конструкции?
19. Как влияет амплитуда на самочувствие человека?
20. Что отражается в заключении по испытанием динамической нагрузкой?
21. Перечислить способы усиления конструкций работающих на динамическую нагрузку.
22. Принцип "наращивания" при усилении конструкций.
23. Принцип изменения конструктивной схемы конструкции при усилении.
24. Принцип изменения расчётной схемы при усилении конструкции.
25. Что такое резонанс и как его избежать при установке на конструкцию оборудования с динамической нагрузкой?

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

ОБРАЗЕЦ

ОБСЛЕДОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЕ И

РЕКОНСТРУКЦИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Лабораторная работа № 6

*"Динамические испытания балки.*

*Определение погрешности* *результатов".*

ИТС

Кафедра "Строительные

конструкции"

ЖУРНАЛ ИСПЫТАНИЙ

ВЫПОЛНИЛ *Иванов И.И.*

ГРУППА *441.*

1. Определение собственной частоты балки

1.1. Схема испытательной установки

**G**

**G**

**P**

**а**

**h**

**а**

**x**

**l**

**l =***3000 мм*

**a =** *0*

**h =** *200 мм*

**Р =** *11 кг*

**G = 0**

Схема осциллографа:

TRA

TRk

R2

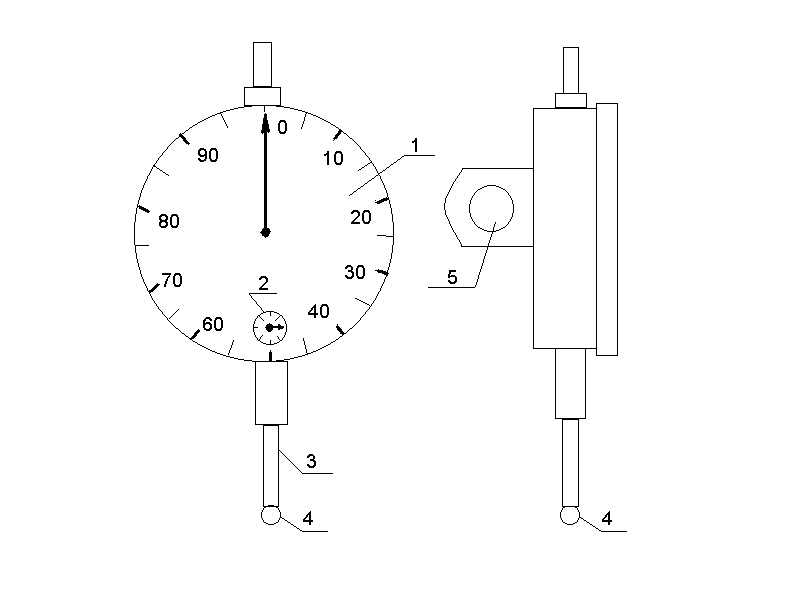
R1

**N**

**N**

Журнал испытания

Схема индикатора (И):



|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| № | 2 амплитуды | | Частоты | |
| сту-  пени | И  (деления) | О  (мм.) | Частотомер |  |
| 1 | 1 | 2 | 200 | 5 |
| 2 | 2 | 3 | 300 | 7.5 |
| 3 | 10 | 4 | 400 | 10 |
| 4 | 8 | 7 | 500 | 12.5 |
| 5 | 75 | 18 | 550 | 13.8 |
| 6 | 90 | 24 | 600 | 15 |
| 7 | 50 | 7 | 700 | 17.5 |
| 8 | 33 | 4 | 800 | 20 |
| 9 |  |  |  |  |
| 10 |  |  |  |  |

Здесь: n — число отверстий в диске; m — передаточное число двигателя.

**1.2**. Определение частоты вибрографом ВР-1

**2А**

**И О**

0 5 8 11 14 17 20 **ϕ**

94

84

72

60

48

36

12

32

28

24

20

16

12

8

4

Схема ВР-1:

**ВИБРОГРАММА**

Расшифровка виброграммы



1.3. Теоретическая частота



1.4. Напряжения в средней части балки



ВЫВОД: Результаты испытания позволяют судить о достоверности искомых величин полученных посредством испытания балки. Небольшое расхождение в цифрах (погрешность) получилось ввиду неопытности испытателей при снятии показаний с приборов.

20 марта 2005г.

**СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Долидзе Д.Е. "Испытание конструкций и сооружений" - М.: Высшая школа. 1975. – 252 с.
2. Лужин О.В., Злочевский А.Б. и др. "Обследование и испытание сооружений" – М.: Стройиздат. 1987. – 263 с.
3. Золотухин Ю.Д. "Испытание строительных конструкций" - Минск: Высшая школа. 1983. – 208 с.
4. Почтовик Г.Я. и др. "Методы и средства испытания строительных конструкций" - М.: Высшая школа. 1973. – 158 с.
5. Шишкин И.Ф. "Метрология, стандартизация и управление качеством" – М.: Изд-во Стандарт. 1990. – 341 с.
6. Землянский А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений: Учебное пособие. - М.: Изд-во АСВ, 2001. - 240 с.