

На правах рукописи

Калашников Михаил Олегович

**Диагностика и контроль качества
строительных конструкций
вибрационными методами**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел - 2011

Работа выполнена на кафедре «Строительные конструкции и материалы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор
Коробко Виктор Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент
Клюева Наталия Витальевна
кандидат технических наук, доцент
Крыгина Алевтина Михайловна

Ведущая организация **ГОУ ВПО «Брянская государственная инженерно-технологическая академия»**

Защита состоится 14 октября 2011 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.182.05 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, ул. Московская, 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситета - УНПК» и на официальном сайте – www.gu-unpk.ru.

Автореферат разослан « 12 » сентября 2011 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент

А.И. Никулин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Диагностика и контроль качества строительных конструкций при их изготовлении и в период эксплуатации является по-прежнему одной из важнейших проблем строительной отрасли хозяйства в нашей стране. Существует множество различных методов диагностики и контроля качества строительных конструкций. Для железобетонных конструкций балочного типа современными нормами регламентируются разрушающие статические испытания, что достаточно трудоёмко и неэффективно. Неразрушающие методы, как правило, позволяют контролировать лишь отдельные физико-механические характеристики конструкций, каждая из которых не даёт общей интегральной оценки их состояния и качества.

Среди неразрушающих методов в последние десятилетия интенсивно развиваются вибрационные методы, которые позволяют во многих случаях получить интегральные оценки состояния и качества конструкции в целом, являются нетрудоемкими и достаточно простыми в реализации. В этих методах критерием оценки качества конструкции являются частоты поперечных и продольных собственных или резонансных колебаний. Исследования последних лет, проведенные в ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» (г. Орёл), показали, что эти критерии не являются чувствительными ко многим дефектам и повреждениям конструкции, и их точность остается невысокой.

Поэтому одной из актуальных проблем в рассматриваемом направлении исследований является поиск новых динамических критериев, обладающих высокой чувствительностью к дефектам и повреждениям строительных конструкций, а, следовательно, к повышению точности оценок при диагностике их состояния и контроле качества.

Среди таких динамических критериев заслуживают внимания коэффициенты нелинейных искажений и амплитудной модуляции, которые широко используются для анализа работы и оценки нелинейных динамических свойств электронных радиотехнических систем. Как показали наши исследования, многие законы динамики электронных радиотехнических систем имеют аналоги в динамике механических систем, и могут быть использованы для диагностики и контроля качества строительных конструкций балочного типа.

Объект и предмет исследования. Объектами исследования являются железобетонные перемычки и составные деревянные однопролетные балки, а предметом исследования – методы вибрационной диагностики и контроля качества строительных конструкций.

Целью диссертационной работы является разработка экспериментально-теоретических методов оценки состояния и контроля качества железобетонных и составных деревянных балок с использованием коэффициентов амплитудной модуляции и нелинейных искажений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– исследовать аналогию между параметрами, характеризующими динамику

электрических (радиотехнических) колебательных систем и механических колебательных систем в виде строительных конструкций балочного типа;

- разработать вибрационные способы диагностики состояния и контроля качества строительных конструкций балочного типа с использованием новых для строительных конструкций динамических критериев – коэффициента нелинейных искажений и коэффициента амплитудной модуляции;

- разработать методики практической реализации предложенных способов;

- провести экспериментальные исследования по динамическому испытанию железобетонных перемычек и деревянных составных балок, выявить закономерности их поведения в зависимости от используемого материала и конструктивных особенностей;

- разработать способы и методики определения количества нагелей в составной балке и жесткости горизонтального шва.

Методы исследования. В ходе проведения теоретических исследований использовались методы аналогий. При подготовке моделей балок для испытаний использовались методы геометрического и физико-механического моделирования строительных конструкций; при проведении экспериментальных исследований и обработке полученных результатов – методы экспериментальной механики и математической статистики.

Достоверность научных положений и результатов подтверждается использованием фундаментальных принципов моделирования строительных конструкций и большим объемом экспериментальных исследований балок из различного материала.

Научная новизна полученных результатов.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований получены следующие новые научные результаты:

- 1 Предложены новые для строительных конструкций динамические критерии для диагностики состояния и контроля качества конструкций балочного типа – коэффициент нелинейных искажений и коэффициент амплитудной модуляции.

- 2 разработаны вибрационные способы и методики определения интегральных физических параметров строительных конструкций балочного типа:

- два способа контроля качества железобетонных балок с использованием коэффициентов нелинейных искажений и амплитудной модуляции;

- два способа определения площади рабочей арматуры и модуля упругости бетона в железобетонных балках с использованием коэффициента нелинейных искажений;

- два способа определения эффективного числа нагелей и коэффициента жесткости горизонтального шва в деревянных составных балках;

- 3 проведён большой объем экспериментальных исследований с железобетонными балками и составными деревянными балками, в ходе которых установлены функциональные связи контролируемых физических параметров конструкций с коэффициентами нелинейных искажений и амплитудной модуляции.

Практическая ценность и реализация работы.

Разработанные в диссертации вибрационные способы диагностики состояния и контроля качества строительных конструкций балочного типа могут найти широкое применение как при обследовании зданий и сооружений, так и при контроле

качества изготовления конструкций на заводах-изготовителях.

Результаты работы рекомендуется использовать в учебном процессе строительных вузов при изучении дисциплины «Обследование и испытание сооружений».

На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- два новых для строительных конструкций динамических критерия для оценки состояния и контроля качества конструкций балочного типа – коэффициент нелинейных искажений и коэффициент амплитудной модуляции;
- два вибрационных способа диагностики и контроля качества балок из любого материала и два способа определения количества нагелей и жёсткости горизонтального шва составных балок;
- методики реализации предложенных способов;
- результаты испытания железобетонных балок и деревянных составных балок.

Диссертационная работа выполнялась в рамках двух научных проектов:

- по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 гг.)»;
- по федеральной программе «Проведение научных исследований коллективами образовательных центров в области строительных технологий» в 2009-2011 гг.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на студенческих научных конференциях ОрелГТУ в 2005...2007 гг.; на научных конференциях профессорско-преподавательского состава университета в 2008...2011 гг.; на Международной научно-технической конференции «Механика неоднородных деформируемых тел: Методы, модели, решения» (Севастополь, 2007 г.); на 3-й Международной выставке-конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Москва, 2009 г.).

Научный дипломный проект, выполненный на эту же тему, участвовал в международном конкурсе студенческих дипломных проектов и работ стран ЕС и СНГ в 2008 году в Праге и получил третье место; третье место присуждено за этот же проект в конкурсе студенческих дипломных проектов и работ строительных вузов РФ, проводимой по эгидой фонда имени профессора А.И. Бартоломея в 2008 году.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе: 7 статей (5 – в журналах, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских диссертаций), 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, общих выводов, библиографии, включающей 98 наименований. Работа изложена на 154 страницах, включая 34 рисунка, 9 таблиц и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности научной проблемы, исследуемой в диссертации, формулируются цель и задачи исследования, научная

новизна работы и достоверность полученных результатов, их научная и практическая ценность, приводятся положения, выносимые на защиту; представлены сведения об апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе содержится краткий аналитический обзор работ по развитию вибрационных методов диагностики и контроля качества строительных конструкций, изложены существующие методы контроля, обсуждаются проблемы их развития, и на основе этого сформулирована основная цель работы.

Среди наиболее известных разработок в области неразрушающего контроля качества железобетонных конструкций следует отметить исследования: НИИЖБ (Клевцов В.А., Бердичевский Г.И., Коревицкая М.Г.), МИСИ (Лужин О.В., Злочевский А.Б., Волохов В.А., Почтовик Г.Я.), ЛенЗНИИЭП и Оргтехстрой Главзапстроя Министерства строительства СССР (Крылов Н.А., Глуховской К.А.), ТбилЗНИИЭП (Сехниашвили Э.А., Власов Л.С., Саркисов Ю.С., Туркия Б.Ш.), Сев.-Кавк. ГТУ (Слюсарев Г.В.) ОрелГТУ (Коробко В.И., Юров А.П.).

В настоящее время в области неразрушающего контроля качества строительных конструкций в нашей стране четко обозначились две тенденции развития, основанные на двух принципиально различных подходах – это дискретные методы и интегральные. В первом случае оценивают значения отдельных параметров качества в результате пооперационного контроля технологических операций при изготовлении конструкций. Во втором случае оценка параметров качества осуществляется по некоторым обобщенным характеристикам, чаще всего по динамическим.

Среди неразрушающих методов особо выделяются вибрационные, которые в последние годы активно развиваются в Орловском ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК» творческим коллективом под руководством профессора В.И. Коробко. Вибрационные методы в качестве критериев оценки большинства требуемых контролируемых параметров строительных конструкций используют частоты свободных (поперечных и продольных) колебаний, резонансные частоты вынужденных колебаний и логарифмический декремент затухания колебаний. Анализ приведенных в обзоре работ показал, что эти критерии обладают невысокой чувствительностью к различного рода дефектам и повреждениям строительных конструкций; частоты колебаний эталонной конструкции в ненагруженном состоянии и этой же конструкции, доведенной практически до разрушения, после разгрузки отличаются всего на 15...20%; логарифмический декремент затухания колебаний при нагружении железобетонных конструкций весьма нестабилен, изменяется скачкообразно. Поэтому в качестве основной цели диссертационной работы предлагается поиск новых динамических критериев, обладающих повышенной чувствительностью к дефектам и повреждениям конструкций, и разработка на их основе новых вибрационных способов диагностики и контроля качества конструкций с широкой экспериментальной апробацией на конструкциях из различных материалов.

Во второй главе рассматриваются теоретические основы и анализ нелинейности искажения и амплитудной модуляции электрических сигналов при исследовании электронных систем в радиотехнике, рассмотрены их статистические составляющие; приводятся сведения о коэффициенте нелинейных искажений $K_{ни}$ и коэффициенте амплитудной модуляции $K_{ам}$. Обсуждается возможность использо-

вания этих коэффициентов для контроля качества строительных конструкций.

Цель широко используемых методов обработки звуковых сигналов состоит в том, чтобы по возможности более полно сохранить содержащуюся в них информацию. Прежде всего, это касается формы сигнала во времени и его спектрального состава. В общем виде система звукопередачи может быть представлена структурной схемой, показанной на рисунке 1.

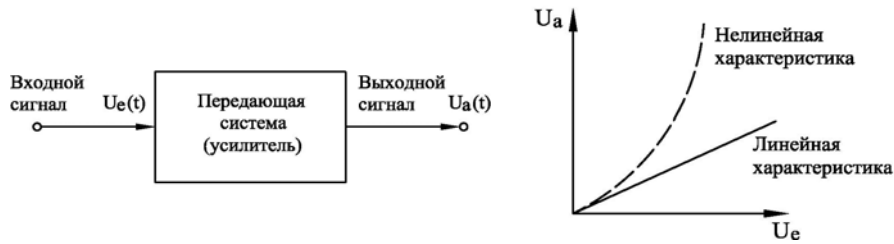


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема системы сигналопередачи

Взаимосвязь между выходными и входными величинами системы описывается передаточной характеристикой. Для сохранения электрического сигнала при обработке его исходных свойств необходимо, чтобы передаточная характеристика системы была линейной («линейная система»). Особенностью линейных систем является то, что они не вносят в выходной сигнал новых спектральных составляющих (гармоники, комбинационные составляющие и т.п.) по сравнению с входным сигналом.

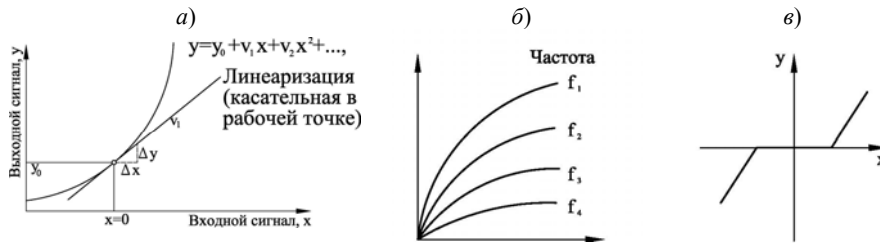
Расчёты нелинейных искажений и обратной связи обычно проводятся при следующих упрощающих предположениях:

- характеристики системы непрерывны и не зависят от времени и частоты;
- нелинейные искажения амплитуд невелики (только квадратичные и кубические составляющие).

Такие характеристики $y = F(x)$ можно легко представить с помощью ряда Фурье (рисунок 2):

$$y = y_0 + v_1 x + v_2 x^2 + v_3 x^3 + \dots, \quad (1)$$

где x – входная величина; y – выходная величина; y_0 – постоянная составляющая (рабочая точка); $v_1 = \partial y / \partial x$ – линейный коэффициент усиления, соответствующей крутизне характеристики в рабочей точке y_0 ; $v_2 = 0,5 \partial^2 y / \partial x^2$, $v_3 = 1/6 \cdot \partial^3 y / \partial x^3$ – квадратичный и кубический коэффициенты, являющиеся составляющими коэффициента нелинейных искажений.



*а – статическая нелинейная характеристика;
 б – частотные зависимости, не удовлетворяющие обычным требованиям;
 в – график немонотонности выходного сигнала*

Рисунок 2 – Спектральные составляющие, характеризующие нелинейность колебательного процесса

Коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$ является мерой искажений простых гармонических колебаний. Он представляет собой отношение эффективных значений гармонических колебаний к эффективному значению суммарного выходного сигнала и измеряется в процентах:

$$K_{\text{ни}} = 100 \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} \approx \frac{100}{A_1} \sqrt{A_2^2 + A_3^2}, \quad (2)$$

где A_i – амплитуда составляющих гармоник с частотами nf . Приведенная в правой части упрощенная формула справедлива для случаев, когда нелинейные искажения невелики ($K_{\text{ни}} \leq 10\%$).

Результаты измерений коэффициента нелинейных искажений соответствуют субъективному восприятию до частот примерно 6 кГц. При более высоких частотах сигнала его гармоники выходят за пределы диапазона слухового восприятия.

Преобразование измерительной информации с целью передачи ее по каналу связи называется модуляцией. Носителями информации в различных каналах связи могут быть электромагнитные колебания оптического, радио и более низкочастотных диапазонов, акустические колебания и т. п. Они характеризуются такими параметрами, как амплитуда, частота колебаний, начальная фаза. Если эти параметры остаются неизменными, то, несмотря, например, на излучение и прием электромагнитных колебаний, никакой передачи информации не происходит. Информация передается тогда, когда изменение (модуляция) одного параметра отражает её содержание. Естественно при этом, что на приемном пункте изменение параметра должно быть вновь преобразовано в сигнал, представляющий собой информацию. Такое обратное преобразование называется демодуляцией.

В самом общем случае сигнал $a(t)$, несущий в себе информацию, можно представить в виде уравнения

$$a(t) = A(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)], \quad (3)$$

где ω_0 – основная частота колебательной системы. В этом выражении амплитуда модулированного колебания $A(t)$ амплитуда и фаза колебаний $\theta(t)$ изменяются по закону передаваемого сообщения.

При использовании вибрационных методов контроля качества строительных конструкций в них возбуждают, как правило, свободные колебания на основной частоте или вынужденные колебания на первой резонансной частоте. Многие строительные конструкции обладают определённой степенью нелинейности, причиной которой могут быть:

- нелинейные физические свойства материала, из которого изготовлены конструкции (железобетонные конструкции);
- податливость нагельных соединений в составных конструкциях (в основном деревянные составные стержни и балки);
- наличие дефектов и повреждений, приобретенных при изготовлении конструкций и в процессе эксплуатации в сооружении (коррозия бетона, металла, неплотное сцепление арматуры с бетоном, проскальзывание рабочей арматуры в опорных узлах, поперечные, наклонные и продольные трещины в железобетонных конструкциях, сколы, местные деформации и др.).

При механических колебаниях конструкций наличие указанных причин влияет на амплитудно-частотные характеристики, описывающие колебательный процесс рассматриваемой системы. Это влияние будет аналогично влиянию ёмкостных сопротивлений в хорошо изученных электронных радиотехнических системах, поскольку законы динамики колебательных систем любой природы одни и те же. Поэтому можно высказать гипотезу о том, что *динамические характеристики, описывающие колебательный процесс электрических нелинейных цепей, по своей физической сущности будут аналогичны соответствующим характеристикам, описывающим колебательный процесс нелинейных механических систем*. Другими словами, *коэффициенты нелинейных искажений и амплитудной модуляции, подсчитанные для строительных конструкций балочного типа, находящихся в условиях колебательного процесса, будут интегрально характеризовать как нелинейность системы, так и её добротность (качество): чем больше коэффициент нелинейных искажений, тем ниже качество конструкции*. Для сравнения этих динамических параметров и оценки качества конструкций необходимо найти их значения для эталонной конструкции, выполненной при строгом соблюдении и контроле всех технологических операций при её изготовлении. Степень отклонения контролируемого параметра эталонной конструкции от соответствующего параметра конструкции серийного изготовления будет интегрально характеризовать качество последней.

Впервые идея использования коэффициентов нелинейных искажений и амплитудной модуляции для диагностики и контроля качества строительных конструкций была высказана Г.В. Слюсаревым.

Проверить высказанную гипотезу можно только опытным путем, проведя серию экспериментов на конструкциях, изготовленных из разных материалов, поскольку в научной литературе отсутствуют какие-либо теоретические исследования функциональных связей рассматриваемых динамических характеристик с контролируемыми параметрами качества.

При решении задач, связанных с оценкой физико-механических свойств деформируемых конструкций с помощью вибрационного метода, целесообразно оценить влияние нелинейности колебательной системы, что можно достичь путем изучения ее частотного спектра и, в первую очередь, распределения энергии по этому спектру между основным тоном и его кратными и некратными гармоника-

ми. Свойства, присущие кратным и некратным гармоникам, существенно различаются. Кратные гармоники имеют набор фиксированных значений частот, кратных основному тону, а некратные – имеют непрерывный спектр, и их вклад в результирующие колебания незначителен. Это объясняется их различной природой. Кратные гармоники вызваны нелинейностью самой колебательной системы, а некратные – паразитной акустической эмиссией, обусловленной проявлением различных микродефектов в материале. На практике в большинстве случаев влиянием некратных гармоник можно пренебречь вообще.

Для количественной оценки вклада кратных гармоник в спектр колебаний контролируемой конструкции можно использовать коэффициент нелинейных искажений $K_{\text{ни}}$, который определяется по спектральному составу колебаний конструкции по формулам (2). Учитывая, что в реальных колебательных системах с невысокой степенью нелинейности ($K_{\text{ни}} \leq 10\%$) вкладом гармоник выше четвертой в общий спектр колебаний можно пренебречь (ввиду их малой амплитуды), то для нахождения $K_{\text{ни}}$ рекомендуется пользоваться второй формулой из (2).

Величина $K_{\text{ни}}$ численно отражает распределение энергии колебаний по их спектру между основным тоном и его гармониками. С физической точки зрения этот параметр характеризует интегральную нелинейность колебательной системы за один цикл простых гармонических колебаний.

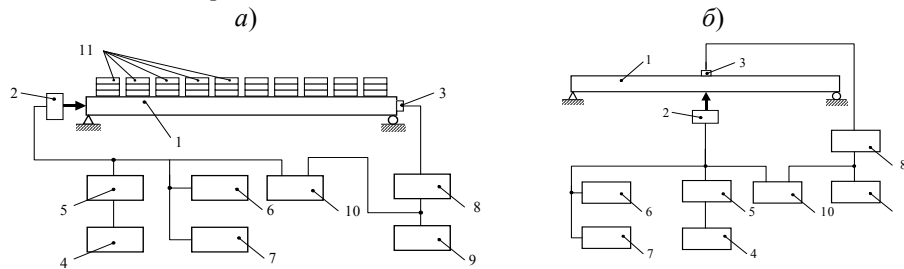
На практике определение спектрального состава колебаний (величин A_1, A_2, A_3, \dots) можно осуществить при помощи специализированного измерительного прибора – анализатора спектра (например, «Вибран-2.0»).

Методически процедуру неразрушающего контроля для оценки качества строительных конструкций с использованием коэффициента нелинейных искажений осуществляют в следующей последовательности:

- закрепляют контролируемую конструкцию на вибрационном стенде в соответствии со схемой испытаний (рисунок 3);
- возбуждают в изделии вынужденные колебания на его резонансной частоте при некотором уровне энергии W и определяют по частотному спектру резонансных колебаний величину $K_{\text{ни}}$;
- повторяя последние две операции, плавно увеличивают уровень вводимой энергии, начиная с минимального до такого уровня энергии, при котором происходит существенное увеличение параметра $K_{\text{ни}}$, характеризующее переход конструкции в стадию упругопластического деформирования, строят зависимость $K_{\text{ни}} - W$;
- путем сопоставления полученной зависимости $K_{\text{ни}} - W$ с аналогичной зависимостью, предварительно построенной для изделия-эталона, делают заключение о качестве контролируемой конструкции.

При проведении лабораторных и натурных исследований было установлено, что величина $K_{\text{ни}}$ для дефектных изделий существенно превосходит величину этого параметра для однотипного добротного изделия при одинаковом уровне энергии W возбуждаемых в них колебаний. Кроме того, у дефектного изделия резкий подъем величины $K_{\text{ни}}$ на кривой $K_{\text{ни}} - W$ начинается при гораздо меньшем уровне

колебательной энергии.



1 – контролируемое изделие, 2 – излучатель механических колебаний,
3 – приемник механических колебаний, 4 – генератор синусоидальных колебаний,
5 – усилитель мощности, 6 – частотомер, 7 – цифровой вольтамперметр,
8 – предварительный усилитель, 9 – анализатор спектра,
10 – электронный осциллограф, 11 – равномерно распределенная нагрузка

Рисунок 3 – Функциональная схема экспериментальной установки для измерения коэффициента нелинейных искажений с использованием продольных (а) и поперечных (б) колебаний

В основу способа контроля физико-механических параметров строительных конструкций с использованием коэффициента амплитудной модуляции $K_{ам}$ положено одновременное возбуждение в деформируемой конструкции как изгибных, так и продольных вынужденных резонансных колебаний с последующей регистрацией результирующих модулированных колебаний и определением по ним коэффициента амплитудной модуляции – параметра, характеризующего степень изменения амплитуды колебаний в зависимости от дефектности строительной конструкции.

Известно, что для протяженных конструкций (балок) частота продольных колебаний обычно на порядок выше частоты изгибных колебаний. Поэтому, используя низкочастотные изгибные колебания как фактор нагружения контролируемой конструкции, можно осуществить амплитудную модуляцию ее высокочастотных продольных колебаний. У качественных изделий уровень такой модуляции будет значительно ниже, чем у дефектных. Этот физический эффект можно объяснить тем, что при воздействии поперечных колебаний происходит периодическое изменение акустического сопротивления (импеданса) материала конструкции для несущих основную информацию продольных колебаний. В наибольшей степени эти изменения происходят в зонах расположения дефектов, поглощающих и рассеивающих энергию продольных колебаний. Именно поэтому особый интерес представляет зависимость коэффициента амплитудной модуляции $K_{ам}$ от энергии изгибных колебаний. Эта зависимость для дефектных изделий проявляется гораздо ярче, чем для добротных.

В случае одновременного возбуждения в контролируемом объекте гармонических колебаний в поперечном и продольном направлениях амплитудно-модулированный сигнал может быть представлен следующим выражением:

$$a_m = A_n \cos \omega_n t + (K_{ам} A_n / 2) \cos \omega_n t \cos \omega_n t = A_n (1 + K_{ам} \cos \omega_n t) \cos \omega_n t, \quad (4)$$

где A_n – амплитуда продольных колебаний; ω_n , ω_n – циклические частоты продольных и поперечных колебаний; a_m – мгновенная амплитуда модулированного сигнала. Это выражение можно преобразовать к следующему виду:

$$a_m = A_n \cos \omega_n t + (A_n K_{ам} / 2) \cos(\omega_n - \omega_n) t + (A_n K_{ам} / 2) \cos(\omega_n + \omega_n) t. \quad (5)$$

Из него видно, что, наряду с колебаниями несущей частоты ω_n , спектр амплитудно-модулированного сигнала содержит две побочные комбинационные составляющие с частотами, соответственно равными $\omega_n - \omega_n$ и $\omega_n + \omega_n$, и одинаковыми амплитудами. Путем сравнения этих амплитуд с амплитудой несущего колебания можно определить величину коэффициента амплитудной модуляции.

При исследовании основных стадий напряженно-деформированного состояния контролируемых конструкций целесообразно использовать зависимости $K_{ам} - W_n$ и $K_{ам} - P_n$ (где W_n – мощность, подводимая к вибровозбудителю изгибных колебаний; P_n – прикладываемая нагрузка), которые позволяют получить дополнительную информацию и более детально изучить изменение физико-механических свойств деформируемых конструкций.

Методически процедуру неразрушающего контроля для оценки качества строительных конструкций с использованием коэффициента амплитудной модуляции осуществляют в следующей последовательности:

– на контролируемой конструкции (рисунок 4) закрепляют вибровозбудители продольных и поперечных колебаний таким образом, чтобы имела возможность раздельного и одновременного их возбуждения в изделии;

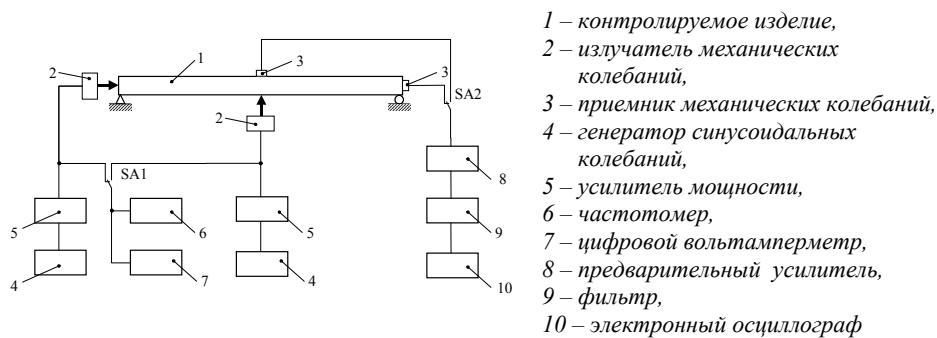


Рисунок 4 – Функциональная схема экспериментальной установки для измерения коэффициента амплитудной модуляции $K_{ам}$

– для регистрации продольных и поперечных колебаний на конструкции устанавливаются приемники механических колебаний (первичные преобразователи);

– используя первое генераторное устройство возбуждают в конструкции изгибные колебания при уровне энергии, принятом за минимальный; подстройкой частоты генератора вводят контролируемую конструкцию в резонанс и определя-

ют ее резонансную частоту ω_n и амплитуду вынужденных изгибных колебаний A_n , после чего генераторное устройство отключают;

- с помощью второго генераторного устройства возбуждают в конструкции продольные колебания при определенном (не изменяемом в дальнейшем) уровне энергии и находят резонансную частоту ω_n и амплитуду вынужденных продольных колебаний A_n ;

- используя оба генераторных устройства, осуществляют одновременное воздействие на конструкцию изгибных и продольных колебаний, взаимное влияние которых приводит к проявлению амплитудной модуляции;

- с помощью первичного преобразователя, предназначенного для регистрации продольных колебаний, фиксируют модулированный сигнал (выделенный полосовым фильтром, настроенным на частоту продольных колебаний ω_n и имеющим ширину полосы пропускания, несколько большую $2\omega_n$ и достаточную для неискаженного прохождения комбинационных составляющих результирующего сигнала с частотами $\omega_n - \omega_n$ и $\omega_n + \omega_n$) и определяют по нему коэффициент амплитудной модуляции $K_{ам}$ для данного уровня энергии изгибных колебаний по формуле:

$$K_{ам} = (A_{макс} - A_{мин}) / (A_{макс} + A_{мин}), \quad (6)$$

где $A_{мин}$, $A_{макс}$ – соответственно минимальная и максимальная амплитуды модулированного сигнала;

- в указанном выше порядке регистрируют амплитудно-модулированный сигнал для других уровней энергии изгибных колебаний и неизменной энергии несущих колебаний; по результатам измерений коэффициента модуляции строят зависимость $K_{ам} - W_n$ для серийного изделия и сопоставляют ее с аналогичной зависимостью, полученной для изделия-эталона.

В третьей главе разрабатываются способы диагностики и контроля качества строительных конструкций с использованием новых динамических критериев – коэффициентов нелинейных искажений и амплитудной модуляции. Излагаются методики определения этих коэффициентов в железобетонных балках и деревянных балках составного и цельного сечений. Приводятся результаты экспериментальных исследований железобетонных балок и составных деревянных балок, построены аналитические и графические зависимости контролируемых физических характеристик строительных конструкций от этих коэффициентов и показана их эффективность по сравнению с основной частотой колебаний.

Для проведения динамических испытаний железобетонных конструкций был изготовлен опытно-промышленный стенд, конструкция которого рекомендована ГОСТ 8829–94 и инструкциями для проведения неразрушающих испытаний. Для контроля и регистрации амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) колебательного процесса использовались приборы серийного изготовления и нестандартные средства первичного преобразования линейных величин в электрические сигналы. Для измерения виброперемещений на боковой поверхности балки закрепляется модулирующий элемент первичного оптоэлектронного преобразователя виброперемещений. Сигнал с измерительного преобразователя через согласующий усилитель поступает на регистрирующий прибор. Возбуждение изгибных колебаний в изделии осуществляется с помощью специального ударного устройства.

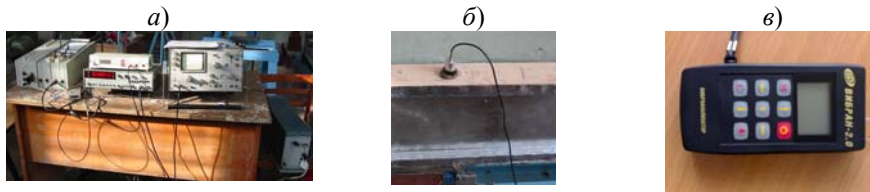
Испытания деревянных балок проводились на специальной установке, которая оснащена серийно выпускаемыми приборами и нестандартными средствами измерений, такими как устройство для возбуждения свободных колебаний в балках, и устройство преобразования виброперемещений в электрический сигнал (индукционный вибродатчик). Поскольку дерево является более податливым материалом, чем бетон или металл, то для испытания таких балок были разработаны специальные опорные устройства.

Установка для проведения динамических и статических испытаний, а также комплект и компоновка используемых устройств, приборов и средств преобразования, обработки и фиксирования информации показаны на рисунках 5 и 6.

Испытываемая балка 1 укладывается на опоры 2 и 3, которые располагаются на направляющих 4, установленных в свою очередь, на основании 5, сваренное из двух прокатных швеллеров. Опоры снабжены вертикальным винтовым зажимом для создания различных граничных условий (жесткого защемления, шарнирного опирания). В опоре имеется горизонтальный цилиндр, предназначенный для создания шарнирно-подвижной опоры.



Рисунок 5 – Установка для испытаний деревянных балок



а – приборы для динамических испытаний;
б - крепление вибродатчика; в – виброанализатор «Вибран «2.0»

Рисунок 6 – Комплекс приборов для проведения испытаний

На верхней части в центре балки закрепляется источник виброколебаний – электродвигатель постоянного тока с дисбалансом ≈ 15 г, скорость вращения вала двигателя регулируется при помощи блока питания. На штативе крепится механический прогибомер марки 6-ПАО с ценой деления 0,01 мм. К направляющим прикреплен индукционный вибродатчик, сигнал с которого поступает на осциллограф

марки С1-65А и на электронный частотомер марки ЧЗ-63/1. Осциллографом контролируется момент наступления резонанса по максимальной амплитуде входного сигнала, а численное значение основного тона колебаний снимается частотомером.

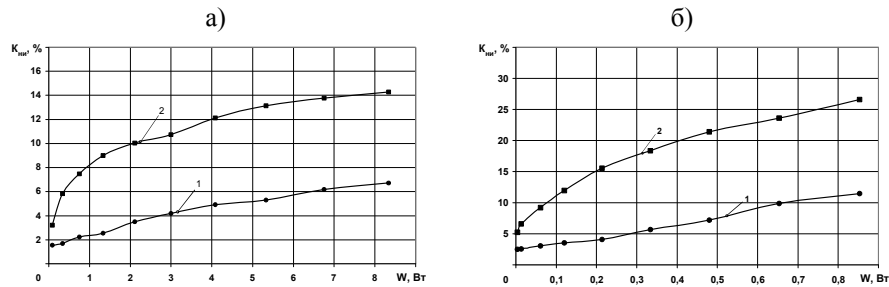
Для контроля полученных результатов частота колебаний балки измерялась также при помощи пьезоэлектрического датчика марки КД-32 в комплекте с виброанализатором спектра «Вибран 2.0», прикрепленного на верхней части балки (рисунок 6, б).

В процессе испытаний составных деревянных балок изменялось количество нагелей, соединяющих между собой её слои. На каждом этапе, нагели расставлялись симметрично с равным шагом.

В качестве объекта исследования при проведении экспериментов над железобетонными балками была выбрана типовая перемычка марки 8ПБ-13-1 длиной 1,30 м и результаты её экспериментального исследования, выполненного В.И. Коробко и Г.В. Слюсаревым, которые были обработаны нами по новой методике. При проведении испытаний перемычки мощность W вибросигнала, подаваемого на вибровозбудитель, увеличивалась ступенчато. На каждой ступени W с помощью анализатора спектра СК4-56 производилось три самостоятельных измерения амплитуд колебаний, соответствующих трем первым частотам собственных колебаний. После замера амплитуд колебаний вибровозбудитель отключался и после небольшого «отдыха» конструкции включался вновь с выходом на тот же уровень энергии для проведения повторных измерений. И так 5 раз, после чего проводилась статистическая обработка результатов измерений.

В качестве добротного (эталонного) изделия использовалась перемычка серийного изготовления. Дефектное изделие было получено из добротного после проведения над ним всех запланированных динамических испытаний. При этом добротное изделие было нагружено постепенно возрастающей статической равномерно распределённой нагрузкой до появления в середине пролёта первой вертикальной трещины. После разгрузки с этой перемычкой был проведён тот же комплекс испытаний, что и с добротной перемычкой.

На рисунке 7 представлены зависимости $K_{нн} - W$.



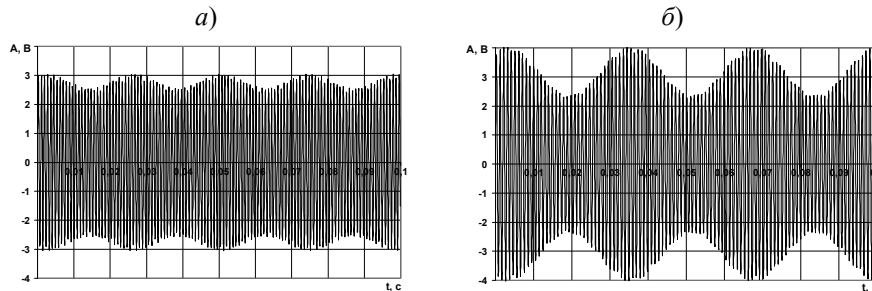
1 – эталонное (добротное) изделие; 2 – дефектное изделие

Рисунок 7 – Зависимость $K_{нн} - W$ при использовании поперечных (а) и продольных (б) колебаний

Анализ данных эксперимента и графиков $K_{ни} - W$, показывает:

- значения коэффициента $K_{ни}$ существенно зависят от мощности энергии, подводимой к вибровозбудителю: чем больше мощность, тем больше $K_{ни}$ (при большей мощности достигается больший размах колебаний, и нелинейные свойства материала конструкции проявляются более отчетливо);
- с увеличением мощности W увеличивается расхождение значений коэффициента $K_{ни}$ у качественного и бракованного изделий;
- мощность сигнала вибровозбуждения при использовании продольных колебаний значительно ниже, чем при возбуждении поперечных колебаний; поэтому при использовании продольных колебаний приборная реализация предлагаемого способа значительно упрощается;
- при использовании продольных колебаний отклонения значений $K_{ни}$ у добротного и бракованного изделий значительно больше, чем при использовании поперечных колебаний, поэтому точность интегральной оценки качества контролируемых конструкций с их использованием существенно выше;
- для определения оптимального уровня необходимой энергии вибровозбуждения контролируемой конструкции необходимо для каждого типа изделий построить график $\Delta K_{ни} - W$ (или аналитическую зависимость) и определить экстремум этой функции.

При определении коэффициента амплитудной модуляции $K_{ам}$ для железобетонной перемычки были получены амплитуды модулированного сигнала, представленные на рисунке 8. Анализ приведенных виброграмм показывает, что амплитуда модулированного сигнала у дефектной конструкции оказалась больше, чем у добротной почти на 30%.



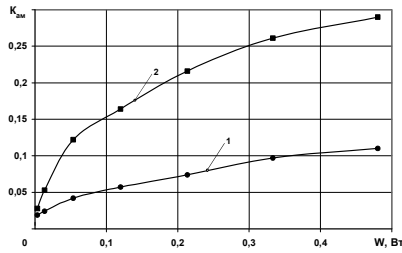
а – добротное (эталонное) изделие; б – дефектное изделие

Рисунок 8 – Виброграммы модулированного сигнала при испытании железобетонных перемычек типа 8ПБ-13-1

Амплитуда модулированного сигнала в первую очередь зависит от энергии $W_{и}$, подводимой к контролируемой конструкции через вибровозбудитель поперечных колебаний (рисунок 9).

При исследовании зависимостей $K_{ам} - W_{и}$ для однотипных железобетонных перемычек типа 8ПБ-13-1₂ было установлено, что при низких уровнях энергии возбуждения поперечных колебаний $W_{и}$ у добротного изделия наблюдается плав-

ное увеличение $K_{ам}$, в то же время у дефектного изделия изменение этого параметра характеризуется существенным ростом.



1 – добротное (эталонное) изделие;
2 – дефектное изделие

Рисунок 9 – Зависимость $K_{ам}$ – W

Это объясняется тем, что при небольших уровнях энергии проявление дефектов происходит последовательно по мере достижения такого уровня, который необходим для «отклика» колеблющейся конструкции на дефект в зависимости от его размеров. При более высоких уровнях энергии происходит вовлечение в работу практически всех дефектных зон и наблюдается снижение скорости роста коэффициента амплитудной модуляции. Дальнейший плавный рост параметра $K_{ам}$ свидетельствует уже о нелинейных свойствах изделия в целом. Для анализа степени

дефектности контролируемой конструкции интегральным показателем её качества может служить величина расхождения кривых для серийного и эталонного изделий при конкретном (заданном) значении энергии поперечных колебаний.

Приведенные результаты динамических испытаний железобетонных перемычек убедительно свидетельствуют о том, что коэффициент амплитудной модуляции может быть использован как самостоятельный или дополнительный критерий для интегральной оценки качества протяженных железобетонных конструкций балочного типа.

Для более глубокого изучения связи коэффициента нелинейных искажений с различными параметрами, характеризующими качество железобетонных балок, проведена серия экспериментов на больsherазмерных моделях, изготовленных в опалубке перемычек марки 2ПБ-26-4. Были изготовлены две серии железобетонных балок длиной 2,59 м, сечением $b \times h = 120 \times 140$ мм. Первая серия (6 балок Б-1...Б-6 по две штуки каждого типа) была изготовлена из одного класса бетона В15 с различным процентом армирования продольной рабочей арматуры (один стержень $d_s = 8, 10, 12, 14, 16$ и 18 мм). Вторая серия (5 балок Б-7...Б-11 по две штуки каждого типа) была изготовлена с одним и тем же процентом армирования (один стержень $d_s = 12$ мм) и различными классами бетона (В7,5, В15, В20, В22,5 и В30). Балки из бетона класса В15 и рабочей арматурой $d_s = 12$ мм были общими для обеих серий.

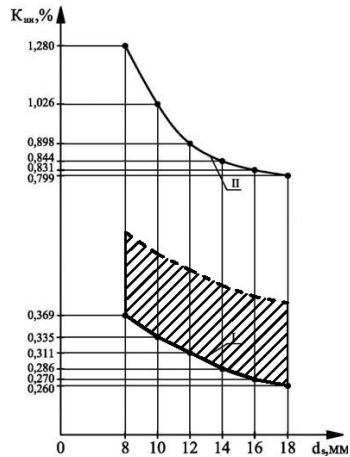
Для этих балок был осуществлен полный комплекс необходимых статических испытаний с определением их жесткости, трещиностойкости и прочности по методике ГОСТ 8829–94. Одновременно со статическими проводились динамические испытания при возбуждении в балках свободных поперечных и продольных колебаний с измерением основной частоты колебаний и определением логарифмического декремента затухания колебаний. Загружение балок осуществлялось силикатным кирпичом ступенями в соответствии с требованиями ГОСТ 8829–94.

Помимо указанных испытаний проводилось определение коэффициента нелинейных искажений балок в ненагруженном состоянии при свободных поперечных колебаниях.

По результатам проведенных экспериментальных исследований были построены аппроксимирующие зависимости коэффициента нелинейных искажений от диаметра арматуры $K_{ни}$ – d_s , а также зависимость коэффициента нелинейных искажений от класса бетона В (рисунки 10 и 11).

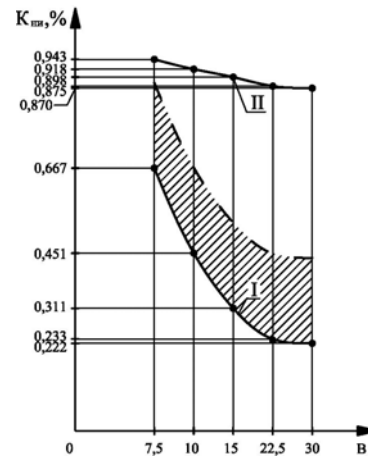
Анализ графиков на рисунке 10 показывает:

- с ростом диаметра (площади) рабочей арматуры значения $K_{ни}$ уменьшаются (чем добротнее конструкция, тем $K_{ни}$ ниже);
- для конструкций с дефектами и повреждениями значения $K_{ни}$ увеличиваются;
- разница между значениями $K_{ни}$ для добротного и дефектного изделий весьма существенная, что свидетельствует о высокой чувствительности этого параметра к различного рода нелинейностям, вызванных появлением дефектов и повреждений.



*I – добротное (эталонное) изделие;
II – дефектное изделие*

Рисунок 10 – Зависимости $K_{ни}$ – d_s при классе бетона В15



*I – добротное (эталонное) изделие;
II – дефектное изделие*

Рисунок 11 – Зависимости $K_{ни}$ – В при диаметре арматуры $d_s = 12$ мм

Анализ графиков на рисунке 11 показывает:

- с ростом класса (марки) бетона значения $K_{ни}$ уменьшаются;
- для конструкций с дефектами значения $K_{ни}$ увеличиваются;
- разница между значениями $K_{ни}$ для добротного и дефектного изделий как и в предыдущем случае существенная.

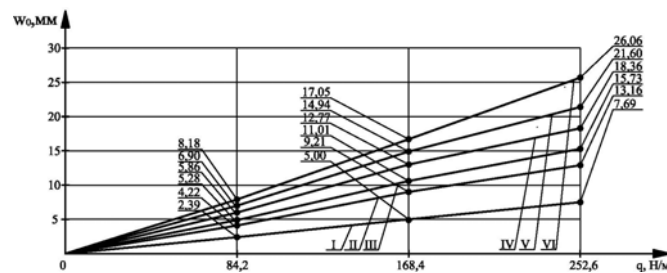
В качестве контролируемых параметров при использовании $K_{ни}$ могут быть: максимальный прогиб балки, контролируемая нагрузка, соответствующая появлению трещин или их раскрытию на заданную величину и т.п.

Таким образом, коэффициент нелинейных искажений может служить самостоятельным критерием для интегральной оценки качества железобетонных конструкций, учитывающим дефекты и повреждения конструкции как полученные

при её изготовлении, так и приобретённые в процессе эксплуатации. В этом случае область допустимых значений $K_{нн}$ должна быть ограничена некоторой кривой, которая устанавливается экспериментально для каждого типа конструкции при освоении её выпуска на заводе-изготовителе (на рисунках 10 и 11 показана пунктирной линией). Область на графике, лежащая ниже этой кривой, является областью допустимых значений $K_{нн}$. На этом принципе разработаны два способа определения диаметра рабочей арматуры и модуля упругости бетона балки по коэффициенту нелинейных искажений.

Для определения жесткости горизонтального шва в составной балке с помощью коэффициента нелинейных искажений была изготовлена двухслойная деревянная балка $50 \times 50 + 50 \times 50$ мм пролётом 2,85 м. Жёсткость горизонтального шва балки изменялась путем последовательной постановки нагелей, начиная с 3-х до 17-ти с равномерным шагом. В качестве нагелей использовались металлические шпильки диаметром 4 мм, которые вставлялись в заранее просверленные в балке отверстия такого же диаметра и затягивались с помощью гаек. Кроме этой балки была изготовлена из той же древесины балка цельного сечения 50×100 мм, которая служила эталоном для сопоставления контролируемых параметров конструкций при проведении испытаний.

Загружение балок статической нагрузкой осуществлялось в шести точках тарированными грузами с постепенным ступенчатым возрастанием нагрузки. На основании результатов экспериментальных исследований построены графики зависимости $w_0 - q$ (рисунок 12) и $K_{нн} - q$ (рисунок 13).



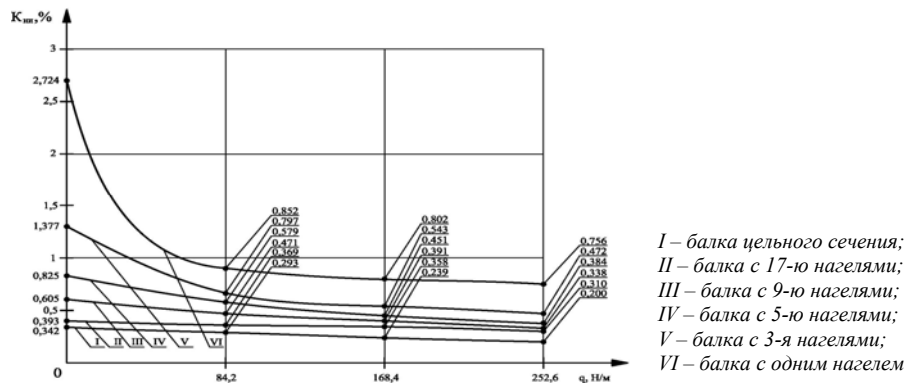
I – балка цельного сечения; II – балка с 17-ю нагелями;
 III – балка с 9-ю нагелями; IV – балка с 5-ю нагелями;
 V – балка с 3-я нагелями; VI – балка с одним нагелем

Рисунок 12 – Зависимости $w_0 - q$

Анализ графиков на рисунке 12 показывает, что зависимости $w_0 - q$ носят практически линейный характер, что подтверждает условия работы исследуемых конструкций в упругой стадии. Тем не менее, с увеличением интенсивности нагрузки наблюдается незначительное их искривление, вызванное податливостью нагельных соединений.

Анализ графиков на рисунке 13 показывает:

- зависимость $K_{нн} - q$ для балки цельного сечения является практически линейной;
- наибольшие нелинейные искажения зависимости $K_{нн} - q$ наблюдаются у составной балки с одним нагелем; с ростом числа нагелей нелинейные свойства конструкции уменьшаются;

Рисунок 13 – Зависимости $K_{нн} - q$

– с ростом нагрузки нелинейные свойства конструкции также уменьшаются.

Последний вывод имеет важное значение при разработке методов контроля физических и геометрических параметров составных балок с использованием коэффициента нелинейных искажений. Наибольшая разница этого коэффициента наблюдается у эталонного и дефектного изделий при отсутствии внешней нагрузки. Поэтому осуществлять пригруз конструкции перед её динамическими испытаниями нецелесообразно.

На основании экспериментальных исследований была также выявлена зависимость $K_{нн}$ составной балки от числа нагелей при различной статической нагрузке:

– с увеличением интенсивности нагрузки q происходит уменьшение $K_{нн}$, что свидетельствует о более полном включении в работу нагелей;

– при увеличении количества нагелей происходит также уменьшение коэффициента нелинейных искажений $K_{нн}$ и его постепенное сближение со значением $K_{нн}$, соответствующим балке цельного сечения.

Помимо указанных зависимостей была исследована зависимость $K_{нн}$ от основной частоты колебаний.

Поскольку коэффициент нелинейных искажений функционально связан с количеством нагелей, с прогибом и с основной частотой колебаний то он, несомненно, связан и с коэффициентом жесткости горизонтального шва ξ составных балок. Очевидно, его можно определять с помощью $K_{нн}$. Используя известное из теории составных балок выражение для определения максимального прогиба и установленную профессором В.И. Коробко, о функциональной связи максимального прогиба с основной частотой колебаний упругих балок можно для двухслойной балки получить соотношение

$$\frac{1}{\lambda^4 D} \left[\frac{1}{\text{ch}\lambda\ell} + \frac{\lambda^2 \ell^2}{2} - 1 \right] + \frac{5\ell^4}{24E_0 I_0} = 1,268 \frac{1}{\text{мо}^2}, \quad (7)$$

где использованы общеизвестные обозначения в теории составных балок и следующие выражения:

$$\lambda = \sqrt{\xi\gamma}; \quad \gamma = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{E_i A_i} + \frac{w^2}{\sum_{i=1}^2 E_i I_i};$$

$$E_0 I_0 = \sum_{i=1}^2 E_i I_i + w^2 \frac{E_1 A_1 \cdot E_2 A_2}{\sum_{i=1}^2 E_i A_i}; \quad \frac{1}{D} = \frac{1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} - \frac{1}{E_0 I_0} = \frac{1}{2EI} - \frac{1}{2EI + w^2 EA/2}.$$

Подставляя в выражение (7) значения входящих в него параметров и измеренную частоту колебаний, можно путем итераций найти значения коэффициента жесткости шва. По результатам проведенных экспериментов при переменном количестве нагелей получена зависимость, график которой представлен на рисунке 14.

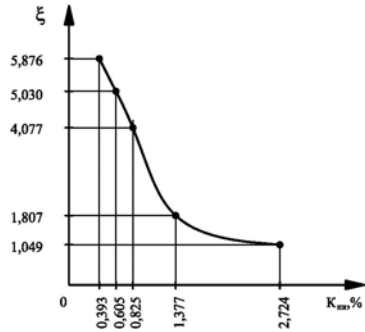


Рисунок 14 – Зависимость ξ – $K_{нн}$

На участке $K_{нн} = 0 \dots 1,377$ эта зависимость носит практически линейный характер, хотя на самом деле эта функция должна иметь асимптотический вид с асимптотой $K_{нн} = 0,322$ – значением, соответствующем $K_{нн}$ для балки цельного сечения. Указанное несоответствие можно объяснить не строгим соблюдением равенства (7) при малом числе нагелей.

Таким образом, коэффициент нелинейных искажений $K_{нн}$ может использоваться для определения коэффициента жесткости шва ξ составной балки. Для этого для конструкции конкретного типа в период её освоения на заводе-

изготовителе следует провести комплекс испытаний с построением аппроксимирующей функции и далее использовать её при контроле качества изготовления таких конструкций в серийном производстве и диагностике их в условиях эксплуатации. Преимущества предложенного метода заключается в его простоте и более высокой точности.

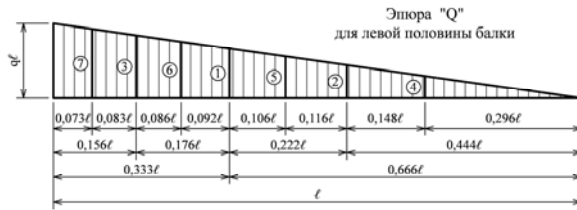


Рисунок 15 – Схема расстановки нагелей в балке с повышенной жесткостью шва

Для составной балки, нагруженной равномерной нагрузкой, используя закон распределения поперечной силы, предложена схема расположения нагелей (рисунок 15), которая позволяет получить швы повышенной жесткости. Эксперименты показали, что такая

схема повышает коэффициент ξ на 15...20 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Обобщая результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1 Установлена аналогия между параметрами, характеризующими динамику электрических (радиотехнических) колебательных систем и механических колебательных систем в виде строительных конструкций балочного типа.

2 Предложены два новых для строительных конструкций динамических критерия для их диагностики и контроля качества – коэффициент нелинейных искажений и коэффициент амплитудной модуляции;

3 Разработано два вибрационных способа диагностики состояния и контроля качества строительных конструкций балочного типа с использованием новых динамических критериев и методики их практической реализации.

4 Проведена большая серия исследовательских экспериментов:

– по испытанию железобетонных балок с разным модулем упругости бетона и одинаковым армированием и одним и тем же модулем упругости бетона и разным процентом армирования; на основе выявленных закономерностей разработаны два способа по определению диаметра арматуры и модуля упругости бетона по динамическому критерию – коэффициенту нелинейных искажений;

– по испытанию составных деревянных балок с переменной жесткостью соединительного шва (разным количеством установленных нагелей); на основе выявленных закономерностей предложены два способа по оценке жесткости шва составной балки по коэффициенту нелинейных искажений и определению эффективного числа нагелей.

5 Предложена конструкция составной деревянной балки с повышенной жесткостью соединительного шва.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации

1 Калашников, М.О. Оценка качества железобетонных конструкций балочного типа вибрационным методом с использованием коэффициента амплитудной модуляции [Текст] / М.О. Калашников, В.И. Коробко, Г.В. Слюсарев // Контроль. Диагностика. – 2005. – № 6. – С. 54-58.

2 Коробко, В.И. Оценка качества железобетонных конструкций балочного типа вибрационным методом с использованием коэффициента нелинейных искажений [Текст] / В.И. Коробко, Г.В. Слюсарев, М.О. Калашников, О.В. Бояркина // Контроль. Диагностика, 2007. – № 11. – С. 14-17.

3 Коробко, В.И. Интегральная оценка дефектности строительных конструкций балочного типа динамическими методами [Текст] / В.И. Коробко, М.О. Калашников, О.В. Бояркина // Строительная механика и расчёт сооружений, 2009. – №1. – С. 44-49.

4 Коробко, В.И. Диагностика и контроль качества железобетонных балок с использованием коэффициента нелинейных искажений [Текст] / В.И. Коробко, М.О. Калашников // Строительство и реконструкция. – 2011. – № 3. – С. 18-23.

5 Гвозков, П.А. Определение числа нагелей в составных деревянных балках вибрационным методом [Текст] / П.А. Гвозков, М.О. Калашников, О.В. Калашникова // Строительство и реконструкция. – 2011. – № 3. – С. 3-6.

В других изданиях

6 Калашников М.О. Новые перспективные методы контроля качества длинномерных железобетонных конструкций с использованием вибрационных технологий [Текст] / М.О. Калашников, В.И. Коробко, Г.В. Слюсарев, С.В. Тиняков // Непрерывное архитектурно-строительное образование как фактор обеспечения качества среды жизнедеятельности: Труды общего собрания РААСН. – Москва – Воронеж, 2005. – С. 202-207.

7 Калашников, М.О. Определение коэффициента совместности работы слоистых пластинок вибрационным методом [Текст] / М.О. Калашников, Коробко В.И. // Материалы Международной научно-технической конференции «Механика неоднородных деформируемых тел. Методы, модели, решения». – Севастополь, 2005. – С. 79-81.

Патенты Российской Федерации

8 Пат. № 2259546 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 M 7/02. Способ неразрушающего контроля качества железобетонных конструкций балочного типа [Текст] / Коробко В.И., Слюсарев Г.В., Калашников М.О.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 2004111574/28; заявлен 15.04.2004; опубл. 27.08.2005, Бюл. №24. – С. 9.

9 Пат. № 2354949 Российская Федерация, МПК⁷ G01M 7/02. Способ неразрушающего контроля качества железобетонных конструкций балочного типа [Текст] / Коробко В.И., Слюсарев Г.В., Калашников М.О.; заявитель и патентообладатель Орловский государственный технический университет. – № 2007105315/28; заявлен 12.02.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. №13. – С. 8.

Подписано к печати 07.09.2011 г. Формат 60×84 1/16.

Печать офсетная. Объем 1,1 усл. п. л. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ФГБОУ ВПО
«Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»
302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, 29.