

На правах рукописи

УДК 624.012.35:524.1

**САВЕЛЬЕВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ**

**МЕТОД И СРЕДСТВО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО АМПЛИТУДНО-  
ВРЕМЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий



**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2003

Работа выполнена в Академии Федерального агентства правительственной связи и информации при Президенте Российской Федерации (Академия ФАПСИ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Иванов Борис Рудольфович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Подмастерьев Константин Валентинович,  
кандидат технических наук,  
Павленко Андрей Анатольевич

Ведущая организация: ООО СКБ "НАУЧПРИБОР" г. Орел

Защита состоится 28 октября 2003 г. в 14. 00 на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при Орловском государственном техническом университете по адресу: РФ, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29

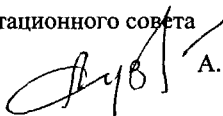
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Орловского государственного технического университета.

Автореферат разослан "25" сентября 2003 г. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять секретарю диссертационного совета по адресу:

РФ, 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор технических наук



А. И. Суздальцев

2003-А  
14877

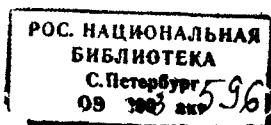
## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Наиболее перспективными в области неразрушающего контроля физико-механических характеристик и оценки качества готовых строительных конструкций являются вибрационные методы, которые в настоящее время практически не используются. Основными причинами такого положения являются: отсутствие общего стандарта на их применение; отсутствие надежного методологического обеспечения, основанного на фундаментальных закономерностях строительной механики; малое количество приемлемых научно-методических разработок по применению вибрационных методов для контроля параметров качества конкретных строительных конструкций; отсутствие надежного и удобного в эксплуатации автоматизированного комплекса средств контроля для проведения динамических испытаний. Допусковый контроль качества железобетонных изделий при данных методах основан на измерениях частоты и логарифмического декремента затухания колебаний в испытуемом изделии и сравнении полученных результатов с аналогичными параметрами эталонной конструкции или модели. При проведении испытаний железобетонную панель размещают на двух опорах испытательного стенда и подвергают ударной нагрузке. Затем регистрируют выходной сигнал вибрационного датчика, размещенного на контролируемом изделии, и по частоте и изменению амплитуды резонансных колебаний судят о прочностных параметрах железобетонной конструкции.

Практическая сложность точного измерения амплитуды резонансных колебаний в железобетонных конструкциях с большим декрементом затухания при проведении экспериментальных исследований, большая трудоемкость и продолжительность обработки полученных данных, жесткие требования к условиям проведения эксперимента приводят к необходимости перехода к измерению частотно-временных параметров сигналов, позволяющему автоматизировать контроль прочности, жесткости и трещиностойкости железобетонных изделий, величину предварительного напряжения арматуры, а также несущую способность конструкций по резонансной частоте и логарифмическому декременту затухания изгибных колебаний.

В связи с этим возникает необходимость совершенствовать вибрационные методы контроля качества железобетонных конструкций в процессе их производства и эксплуатации, проводить изучение и уточнение взаимосвязи интегральных параметров качества конструкций с динамическими характеристиками. Поэтому разработка новых методов и средств неразрушающего контроля прочности железобетонных конструкций с автоматической обработкой информации, позволяющих повысить точность контроля и уменьшить его продолжительность, является актуальной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

**Целью диссертационной работы** является повышение точности измерения параметров резонансных затухающих колебаний при контроле качества железобетонных изделий.



**Основными задачами исследования** являются:

- анализ современных методов неразрушающего контроля качества предварительного напряженных железобетонных конструкций;
- теоретический анализ взаимосвязи частотно-временных и амплитудных параметров затухающих колебаний;
- оценка точности амплитудно-временного преобразования сигналов;
- разработка алгоритмов высокоточного измерения периода, основной резонансной частоты и логарифмического декремента затухания резонансных колебаний;
- разработка требований к параметрам контролирующей аппаратуры, обеспечивающих требуемую точность измерения параметров затухающих колебаний при виброчастотном методе контроля качества изделий;
- разработка структурной схемы универсального, микромощного малогабаритного цифрового устройства контроля прочностных параметров железобетонных изделий с амплитудно-временным преобразованием затухающих колебаний, позволяющего реализовать измерения резонансной частоты и логарифмического декремента затухания колебаний при сравнительно малых аппаратных затратах;
- обоснование возможности расширения областей применения виброчастотного метода контроля строительных конструкций по амплитудно-временным параметрам затухающих колебаний.

**Методы исследования.** При решении задач использовались методы математического и схемотехнического моделирования с применением ПЭВМ, математический анализ, теория рядов, операционное исчисление, спектральное разложение сигналов.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) разработан виброчастотный метод неразрушающего контроля качества строительных конструкций, основанный на амплитудно-временном преобразовании параметров затухающих колебаний, в рамках которого:
  - разработаны способы высокоточного измерения основной резонансной частоты и декремента затухания резонансных колебаний, обеспечивающие повышение точности измерения от трех до восьми раз при одновременном уменьшении продолжительности виброчастотного контроля различных параметров качества изделий;
  - разработаны алгоритмы экспресс-измерения резонансной частоты и логарифмического декремента затухания колебаний;
  - разработаны способы экспресс-контроля качества строительных конструкций по периодам затухающих резонансных колебаний;
- 2) разработаны структурная схема и принципы построения универсального микромощного малогабаритного цифрового устройства контроля.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

- получены выражения для расчета амплитудно-временных параметров затухающих резонансных колебаний, позволяющие упростить реализацию аппаратуры виброчастотного контроля за счет сокращения вычислительных операций при оценке прочностных параметров конструкций;
- предложена усовершенствованная методика виброчастотного экспресс-контроля основных интегральных параметров качества строительных конструкций, в том числе прочности, жесткости и трещиностойкости;
- разработаны алгоритм преобразования и универсальный быстродействующий прибор виброчастотного контроля качества железобетонных изделий, позволяющие сократить продолжительность контроля и уменьшить трудоемкость его проведения.

**Реализация и внедрение результатов исследований.**

Результаты диссертационной работы внедрены в ООО СКБ «Научприбор» (г. Орел) и использованы в учебном процессе Академии ФАПСи.

**Апробация и публикации результатов работы.** Основное содержание диссертационных исследований изложено в докладах на 4-й международной конференции и выставке "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (Москва, 2002 г.), на 4-й межведомственной конференции "Научно-техническое и информационное обеспечение деятельности специальных служб" (Москва, 2002 г.), на 5-й международной конференции и выставке "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (Москва, 2003 г.), на 11-й международной конференции "Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов" (Москва, 2002 г.), на вторых международных научных чтениях Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) "Новые энергосберегающие архитектурно- конструктивные решения жилых и гражданских зданий" (Орел, 2003 г.).

Основные положения работы изложены в 9 публикациях в периодической научной печати, оформлена заявка на изобретение.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) метод виброчастотного контроля качества железобетонных конструкций с амплитудно-временным преобразованием параметров затухающих колебаний, онованный на:

- алгоритмах высокоточного измерения параметров резонансных колебаний с большим логарифмическим декрементом затухания;
- способах экспресс-контроля качества строительных конструкций по амплитудно-временным параметрам затухающих резонансных колебаний;

2) универсальная структурная схема микромощного малогабаритного цифрового устройства контроля.

**Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемых источников и приложений. Работа изложена на 144 страницах, включает 36 рисунков, 8 таблиц и 7 страниц приложений. Библиография включает 139 наименований работ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цель и решаемые задачи, указаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен сравнительный анализ методов неразрушающего контроля прочности и испытаний железобетонных строительных конструкций, их особенностей и возможностей, указаны основные способы измерений частотно-временных параметров и характеристики измерительных приборов, реализующих данные методы.

Существующие методы и средства неразрушающего контроля прочности строительных изделий позволяют определять физико-механические характеристики железобетонных конструкций, а также прочностные параметры бетона в локальных местах и в большинстве случаев непригодны для интегральной оценки их прочности, жесткости и трещиностойкости. Кроме того, они основаны на корреляционной зависимости между прочностью бетона и каким-либо косвенным параметром материала. Существенным недостатком этих методов является зависимость погрешности оценки прочности бетона в конструкциях от достоверности корреляции косвенных параметров бетона с его прочностными показателями.

Особое место в неразрушающем контроле прочности железобетонных изделий занимают методы вибросредоточного контроля. В частности, модифицированный метод интегральной экспресс-оценки параметров качества таких конструкций позволяет расширить области применения способов динамического контроля и упростить их аппаратную реализацию, снизить затраты на проведение испытаний при одновременном повышении точности измерений и улучшении достоверности контроля.

Преимущество данного метода заключается в необходимости определения только одной динамической характеристики – основной частоты колебаний конструкции в ненагруженном состоянии, которая изменяется практически монотонно с ростом нагрузки. Оценка параметров качества (прочности, жесткости, трещиностойкости) осуществляется не по графикам, а по расчетным формулам. По результатам сравнения значений динамических параметров эталонного и контролируемого изделий выносятся суждения о прочности, жесткости, трещиностойкости и величине преднапряжения арматуры испытываемого изделия. К недостаткам данного метода можно отнести сложность проводимых экспериментов, так как регистрация перемещений элементов конструкций должна осуществляться в течение определенного времени. При проведении эксперимента не исключена возможность определения колебаний, соответствующих ложному резонансу (при настройке на гармонику колебания, кратную основной частоте колебания изделия). Данный процесс, с учетом подготовительных мероприятий к эксперименту (установка изделия на испытательный стенд, его центровка, моделирование равномерно распределенной нагрузки), характеризуется большой продолжительностью во времени.

Анализ применяемых методов контроля показал, что необходимо продолжить дальнейшие исследования с целью повышения точности проводимых измерений основной частоты колебаний изделий, используемой в качестве основной информативной характеристики при оценке прочности и диагностике качества железобетонных изделий. Для упрощения испытаний нужно автоматизировать проведение расчетов в новых устройствах контроля физико-механических параметров изделий и обеспечить снижение энерго- и материалоемкости аппаратуры, основанной на данных методах. Реализация таких вопросов позволит, в конечном счете, более эффективно решить ряд народнохозяйственных задач в области строительства, безопасности эксплуатации сооружений, при защите и охране специальных объектов.

Во второй главе установлена взаимосвязь частотно-временных и амплитудных параметров затухающих колебаний в железобетонных изделиях и разработаны два алгоритма вычисления длительности периодов затухающих колебаний, обеспечивающие повышение точности измерения при сравнительно небольших аппаратных затратах на их реализацию.

В настоящее время при допусковом контроле качества железобетонных изделий вибростатным методом регистрируют резонансную частоту колебаний с погрешностью в единицы процентов. При этом точность измерения частоты колебаний в конструкциях с относительно большим логарифмическим коэффициентом затухания ограничивается методической и инструментальной погрешностями.

Для исследования методической погрешности измерения частоты проведено моделирование процесса затухающих колебаний по программе *MathCAD*. Было установлено, что при экспоненциальном понижении амплитуды затухающих колебаний  $U_M$  при увеличении логарифмического декремента затухания  $\delta$  и пороговых напряжений  $\pm U_{\text{ПОР}}$  срабатывания формирователя импульсов методическая погрешность измерения длительности периода колебаний возрастает. Данная методическая погрешность  $\gamma_M$  также увеличивается по мере уменьшения амплитуды колебаний, поэтому каждый последующий измеряемый период колебаний  $T_{X_{j+1}}$  превосходит по длительности каждый предыдущий  $T_{X_j}$  (рисунок 1).

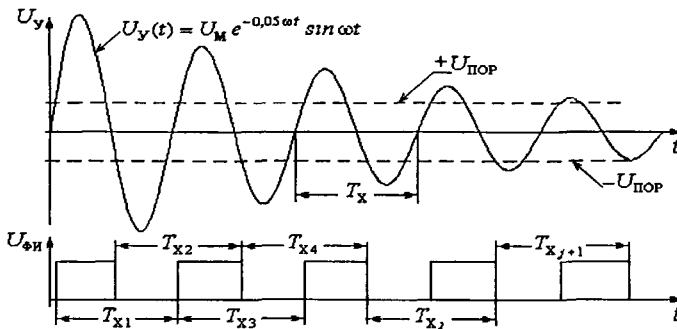


Рисунок 1 – Временные диаграммы процесса затухающих колебаний

Согласно проведенным расчетам, результаты которых приведены в таблице 1, методическая погрешность резко возрастает при установке уровней пороговых напряжений  $U_{\text{пор}} \geq 0,1U_M$ . При значениях логарифмического декремента затухания  $\delta \geq 0,1$  практически возможно измерение длительностей только нескольких первых (трех – четырех) периодов, так как в дальнейшем амплитуда колебаний становится ниже пороговых уровней срабатывания триггера Шмитта, служащего для формирования импульсов, и его срабатывание прекращается. Данное обстоятельство не позволяет реализовать цифровое измерение резонансной частоты затухающих колебаний методом непосредственного счета импульсов при фиксированной длительности цикла измерения.

Таблица 1 – Зависимость методической погрешности от параметров колебаний

Погрешность	Обозначения периодов колебаний										Параметры	
	$T_{x1}$	$T_{x2}$	$T_{x3}$	$T_{x4}$	$T_{x5}$	$T_{x6}$	$T_{x7}$	$T_{x8}$	$T_{x9}$	$T_{x10}$	$U_{\text{пор}}/U_M$	$\delta$
$\gamma_M, \%$	0,42	0,47	0,53	0,61	0,68	0,79	0,90	1,04	1,21	1,41	0,05	0,05
$\gamma_M, \%$	0,73	0,83	0,96	1,11	1,29	1,50	1,77	2,10	2,53	3,10	0,10	0,05
$\gamma_M, \%$	1,37	1,61	1,90	2,26	2,74	3,39	4,37	6,19	–	–	0,20	0,05
$\gamma_M, \%$	1,22	1,59	1,88	2,43	3,23	4,28	6,70	16,8	–	–	0,05	0,10
$\gamma_M, \%$	1,97	2,56	3,43	4,81	13,7	–	–	–	–	–	0,10	0,10

При реальных испытаниях железобетонных конструкций нельзя измерять длительность первого периода сразу после окончания ударного импульсного воздействия, так как резонансные колебания устанавливаются с некоторой задержкой, обусловленной переходными процессами. Поэтому практически невозможно повысить точность измерения частоты известными способами, что требует разработки новых алгоритмов, позволяющих обеспечить высокоточный контроль резонансной частоты и логарифмического декремента затухания с автоматической отстройкой от мешающих факторов, в том числе и от нестабильности амплитуды колебаний.

Для повышения достоверности контроля качества железобетонных изделий предложен новый способ высокоточного измерения периодов резонансных колебаний с относительно большим логарифмическим декрементом затухания колебаний  $\delta$ . Согласно данному способу, выходной сигнал вибродатчика усиливается и сравнивается с разнополярными пороговыми напряжениями  $\pm U_{\text{пор}}$ , которые выбираются значительно меньше амплитуды  $U_M$  колебаний по условию  $|U_{\text{пор}}| \leq 0,1U_M$ . В результате сравнения формируются импульсы, длительность  $\Delta T_i$  каждого из которых зависит от времени изменения выходного сигнала усилителя  $U_y(t) = U_M e^{-\delta \omega t} \sin \omega t$  между двумя пороговыми напряжениями  $\pm U_{\text{пор}}$  и обратно пропорциональна мгновенной амплитуде  $U_M$  каждой полуволны резонансных затухающих колебаний (рисунок 2).



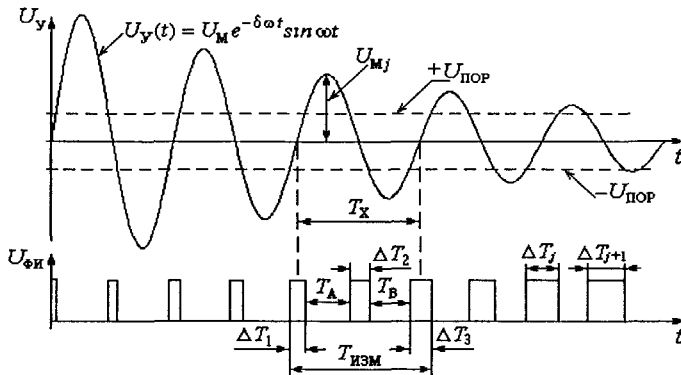


Рисунок 2 – Временные диаграммы процесса измерения периода

Согласно графикам рисунка 2, начало и конец измеряемого периода  $T_X$  соответствуют примерно середине длительностей первого  $\Delta T_1$  и третьего  $\Delta T_3$  импульсов в рассматриваемом интервале измерения  $T_{ИЗМ}$ . Поэтому, если синхронизировать цикл измерения с фронтом любого  $j$ -го импульса и заканчивать его по срезу  $(j + 3)$ -го импульса, то для вычисления периода можно использовать выражение вида:

$$T_X = T_A + \Delta T_2 + \Delta T_B + 0,5(\Delta T_1 + \Delta T_3), \quad (1)$$

где  $T_A$  и  $T_B$  – длительности двух пауз между импульсами (рисунок 2).

В простейшем случае цифрового измерения периода посредством его заполнения импульсами высокой опорной частоты, суммируемыми в счетчике, можно использовать менее точное выражение, основанное на линейной аппроксимации длительностей импульсов  $\Delta T_2 \approx (\Delta T_1 + \Delta T_3)/2$ . С учетом такого допущения не требуется выполнять операцию умножения на дробный коэффициент, поэтому для расчета периода  $T_X$  затухающих колебаний можно использовать формулу вида:

$$T_X \approx \Delta T_1 + T_A + T_B + \Delta T_3. \quad (2)$$

Для реализации формулы (2) нужно суммировать результаты измерений двух полупериодов колебаний, первый из которых начинается по фронту первого ( $j$ -го) импульса и заканчивается по фронту второго ( $j + 1$ ). Второй полупериод колебания должен измеряться с задержкой – он начинается по срезу второго ( $j + 1$ -го) и оканчивается по срезу третьего ( $j + 2$ -го) импульса в цикле измерения  $T_X$  (рисунок 2).

Длительность периода резонансных колебаний  $T_P$  связана с номинальным периодом затухающих колебаний  $T_{X\text{НОМ}}$  через логарифмический декремент затухания  $\delta < 1$ :

$$T_P = T_{X\text{НОМ}} \cdot \sqrt{1 + \delta^2}.$$

Поэтому относительная погрешность измерения периода резонансных колебаний по формулам (1), (2) определяется выражением

$$\gamma_M = \frac{T_x - T_P}{T_P} \cdot 100 \%$$

Погрешность  $\gamma_M$  зависит от логарифмического декремента затухания  $\delta$  и от отношения пороговых уровней  $U_{\text{ПОР}}$  к амплитуде колебаний  $U_M$ . Расчет данной погрешности при оценке длительности периода по формуле (1) выполнен в среде *MATHCAD*, и его результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость погрешности расчета  $T_x$  от параметров колебаний

Погрешность	Обозначения периодов колебаний										Параметры	
	$T_{x1}$	$T_{x2}$	$T_{x3}$	$T_{x4}$	$T_{x5}$	$T_{x6}$	$T_{x7}$	$T_{x8}$	$T_{x9}$	$T_{x10}$	$U_{\text{ПОР}}/U_M$	$\delta$
$\gamma_M, \%$	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17	0,05	0,05
$\gamma_M, \%$	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,18	0,20	0,24	0,30	0,41	0,10	0,05
$\gamma_M, \%$	0,52	0,54	0,58	0,64	0,79	1,20	5,07	-	-	-	0,05	0,10
$\gamma_M, \%$	0,59	0,67	0,85	1,55	-	-	-	-	-	-	0,10	0,10

Сравнение данных из таблиц 1 и 2 показывает, что использование предложенных алгоритмов расчета позволяет значительно – от трех до восьми раз – снизить методическую погрешность измерения периодов  $T_x$  затухающих колебаний при одинаковых значениях параметров  $\delta$  и  $U_{\text{ПОР}}/U_M$ .

Вычисления длительности периода колебаний  $T_x$  по формулам (1) и (2) можно реализовать не только с помощью микропроцессора, но и на реверсивном счетчике, если выполнять умножение на коэффициент 0,5 посредством двукратного снижения частоты  $f_0$  счетных импульсов.

Формирование импульсов, длительность  $\Delta T_j$  каждого из которых обратно пропорциональна мгновенной амплитуде  $U_M$  каждой полуволны сигнала, позволяет реализовать не только точное измерение периодов, но и упростить вычисление логарифмического декремента затухающих колебаний:

$$\delta \approx 2(\Delta T_{j+1} - \Delta T_j) / \pi(\Delta T_{j+1} + \Delta T_j) \quad (3)$$

Согласно (3), при расчете коэффициента затухания колебаний нужно выполнить операцию деления разности измеряемых длительностей импульсов на их сумму. Следовательно, при реализации такого алгоритма для оценки коэффициента затухания требуется сначала измерить цифровым способом длительности импульсов и затем выполнить простые арифметические операции вычитания, сложения и деления (с учетом числа  $\pi$ ).

При проведении исследований по оценке граничных условий применения метода амплитудно-временного преобразования для целей вибрационного контроля конструкций использовалось моделирование процесса затухающих коле-

баний на ПЭВМ по программе *MathCAD*. На основании математического моделирования нормированной функции колебательного процесса установлена зависимость погрешности измерения периодов затухающих колебаний от значений относительного декремента затухания при различных значениях пороговых напряжений, используемых для амплитудно-временного преобразования. Установлена реальная возможность повышения точности преобразования посредством стабилизации пороговых напряжений, либо за счет стабилизации зоны гистерезиса при использовании простых формирователей импульсов на логических элементах

**В третьей главе** рассматриваются способы оценки интегральных параметров качества при разделении изгибных и крутильных колебаний основной частоты, возникающих в железобетонном изделии при вибрационном воздействии, а также возможность проведения допускового контроля качества железобетонных конструкций и определения мест расположения скрытых дефектов железобетонных изделий по результатам измерений длительностей периодов резонансных колебаний.

Надежную оценку характеристик качества контролируемых изделий можно получить при высокоточном определении значений их динамических параметров. Однако на параметры изгибных колебаний оказывают существенное влияние крутильные колебания, обусловленные неравномерностью натяжения арматурных стержней, а также структурными неоднородностями изделий. Преодолеть влияние этих факторов позволяет усовершенствованный способ разделения колебаний железобетонных панелей на изгибную и крутильную составляющие.

Согласно данному способу, для определения резонансной частоты и разделения изгибных и крутильных колебаний изделие устанавливают на подвижную и неподвижную опоры испытательного стенда, закрепляют на противоположных боковых сторонах изделия два вибрационных датчика и подвергают контролируемому изделию ударной нагрузке (рисунок 3).

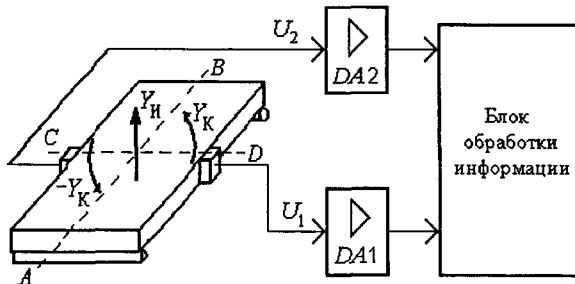


Рисунок 3 – Схема стенда для разделения крутильных и изгибных колебаний

При наличии крутильных колебаний в контролируемом изделии происходит их наложение (суперпозиция) на изгибные колебания. Фаза крутильного колебания на одной боковой стороне изделия противоположна фазе крутильного колебания на его другой боковой стороне, поэтому выходной сигнал  $U_1$  одного датчика пропорционален сумме составляющих изгибного  $Y_{и}$  и крутильного  $Y_{к}$  колебаний, а выходной сигнал  $U_2$  второго датчика – разности этих составляющих:

$$U_1 = K_{д}(Y_{и} + Y_{к}); \quad U_2 = K_{д}(Y_{и} - Y_{к}),$$

где  $K_{д}$  – коэффициент, зависящий от геометрических и механических параметров изделия и характеристик вибрационных датчиков.

Длительности интервалов времени  $\Delta T_{j1}$ ,  $\Delta T_{j2}$ , в течение которых выходные сигналы  $U_{y1}$ ,  $U_{y2}$  усилителей  $DA1$ ,  $DA2$  изменяются от первого ( $-U_{\text{ПОР}}$ ) до второго ( $+U_{\text{ПОР}}$ ) пороговых уровней в начале и в конце каждого полупериода резонансных колебаний, обратно пропорциональны соответственно сумме или разности изгибных и крутильных колебаний контролируемого изделия и определяются простыми соотношениями:

$$\Delta T_{j1} \approx U_{\text{ПОР}} / K_{д} K_{y1} (Y_{и} + Y_{к}) \pi f_{р}; \quad \Delta T_{j2} \approx U_{\text{ПОР}} / K_{д} K_{y2} (Y_{и} - Y_{к}) \pi f_{р}.$$

В блоке обработки информации выполняется измерение цифровым способом длительностей  $\Delta T_{j1}$ ,  $\Delta T_{j2}$  выходных импульсов аналоговых компараторов в каждом периоде, по значениям которых можно вычислить эквивалентные амплитуды механических изгибных и крутильных колебаний контролируемого железобетонного изделия.

Положительный эффект от практического использования двухканальной схемы контроля параметров резонансных колебаний заключается в реальной возможности повышения помехоустойчивости и точности измерения сигналов малого уровня, формируемых при маломощном ударном воздействии. В частности, при оценке прочности эксплуатируемых зданий и сооружений для возбуждения резонансных колебаний необходимо ограничивать мощность (или силу) ударов, что приводит к пропорциональному понижению амплитуды резонансных колебаний и, соответственно, к возрастанию относительного уровня помех и шумовых составляющих, влияющих на точность измерения. При этом типовые способы повышения помехоустойчивости, основанные на применении узкополосных фильтров или синхронном детектировании, не позволяют обеспечить высокоточное измерение длительностей периодов и резонансной частоты колебаний при большом логарифмическом декременте затухания  $\delta$ .

Применяемые в настоящее время вибродиагностические способы неразрушающего допускового контроля качества железобетонных изделий основаны на измерении частоты и коэффициента затухания резонансных колебаний испытываемого образца, и их сравнении с аналогичными параметрами эталонной конструкции или ее эквивалентной модели. Для оценки прочностных характеристик,

к которым в первую очередь относятся интегральная оценка несущей способности, прочность, жесткость и трещиностойкость железобетонных изделий, используют эмпирические соотношения между динамическими и интегральными параметрами качества изделия. При сравнительной простоте методики допускового контроля механических параметров его достоверность практически ограничивается точностью измерения резонансной частоты в низкочастотном и инфранизкочастотном (ниже 20 Гц) диапазонах. Как правило, измерение частоты в указанных диапазонах выполняется с относительной погрешностью не менее 1 %, что обусловлено влиянием методической погрешности дискретности (при длительности цикла цифрового измерения частоты в пределах от одной до десяти секунд). Более перспективным способом контроля качества железобетонных изделий является использование предварительного амплитудно-импульсного преобразования выходных сигналов вибрационных датчиков, установленных на боковых поверхностях контролируемого изделия. Такое преобразование позволяет повысить точность, исключить влияние крутильных колебаний на результат измерения и одновременно упростить в целом конструкцию устройства контроля. При использовании данного способа можно реализовать допусковый контроль прочностных параметров посредством сравнения длительностей периодов резонансных колебаний испытуемого и эталонного изделий одинаковой конструкции.

Для интегральной оценки качества предварительно изгибаемых железобетонных элементов при допусковом контроле в микропроцессоре блока обработки информации реализован алгоритм вычисления отношения величин по обобщенной формуле вида:

$$F = K_{\text{пр}} F_3 P_3 T_3^2 / P T_P^2, \quad (4)$$

где  $K_{\text{пр}}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый эмпирическим путем в зависимости от конструкций эталонного и контролируемого изделий;  $F_3$ ,  $F$  – значения контролируемых параметров соответственно эталонного и испытуемого элементов;  $P_3$ ,  $P$  – масса соответственно эталонного и испытуемого элементов;  $T_3$ ,  $T_P$  – периоды резонансных колебаний эталонного и испытуемого элементов.

Для автоматического выполнения расчетов по формуле (4) необходимо перед началом процесса допускового контроля вводить с клавиатуры в микропроцессорный блок обработки информации диагностического устройства соответствующие значения эталонных параметров. Использование обобщенной формулы (4) позволяет обеспечить универсальность допускового контроля различных прочностных параметров железобетонных изделий в условиях серийного производства строительных конструкций.

В частности, для контроля несущей способности при изгибе железобетонного элемента устройством с амплитудно-временным преобразованием и использованием выражения (4) необходимо ввести с клавиатуры в блок памяти микропроцессора значения измеренной массы эталонного  $m_3$  и контролируемого  $m$  изделий и значение предельной нагрузки эталонного элемента  $q_3$ . Затем нужно измерить цифровым способом соответственно длительности периодов  $T_3$  и  $T_P$ ,

после чего автоматически производится оценка предельной нагрузки  $q$  контролируемого элемента по соотношению:

$$q = q_3 m T_3^2 / m_3 T_p^2, \quad (5)$$

которое используют в качестве характеристики несущей способности контролируемого элемента. Аналогичным образом можно реализовать допусковый контроль по максимально-допустимому прогибу  $W$  контролируемого элемента с применением простейших вычислений. При этом в выражении (5) вместо предельной несущей способности эталонной конструкции  $q_3$  необходимо использовать значение его максимального прогиба  $W_3$ , что позволяет оценить прогиб испытываемого железобетонного изделия по формуле:

$$W = W_3 m T_3^2 / m_3 T_p^2. \quad (6)$$

Практически изменение вида параметра при проведении допускового контроля сводится к введению значений разных коэффициентов в блок памяти микропроцессора, а алгоритм вычислений не изменяется.

Приведенные выражения (4), (5) могут быть использованы не только при проведении допускового контроля железобетонных изделий в условиях серийного производства, но и для оценки трещиностойкости и предельной разрушающей способности строительных конструкций. Например, если в качестве меры предельной нагрузки эталонного элемента использовать нагрузку, при которой ширина раскрытия трещины достигает допустимого значения, то при записи значения  $m_3$  этой нагрузки в память микропроцессора результат вычислений можно интерпретировать в виде параметра трещиностойкости контролируемого элемента. Если же в качестве параметра массы  $m_3$  использовать предельную нагрузку эталонной конструкции, то результат вычислений по формуле (5) будет являться характеристикой предельной прочности контролируемого изделия.

Для определения типов и мест расположения скрытых дефектов железобетонных изделий предложено усовершенствовать типовую методику диагностики – после ударного возбуждения резонансных колебаний в контролируемом изделии выполнять сравнение периодов колебаний и логарифмического декремента затухания с аналогичными динамическими параметрами эталонной конструкции при последовательном перемещении сосредоточенной нагрузки по продольной оси изделия.

Сочетание предложенного способа разделения изгибных и крутильных колебаний с усовершенствованными способами оценки несущей способности, прочности, жесткости и трещиностойкости позволяет упростить процесс контроля и диагностики железобетонных изделий различного типа.

*Четвертая глава* посвящена обоснованию использования акселерометров для преобразования динамических параметров колебаний в электрический сигнал, а также особенностям вибрационного контроля охраняемых помещений в технических системах охраны. На основании сравнительного анализа харак-

теристик акселерометров, применяемых для преобразования динамических параметров колебаний в электрический сигнал, предложено использовать акселерометры типа *ADXL105*. Такие датчики имеют малые габариты и низкое энергопотребление, что позволяет их применять в мобильных высокочувствительных устройствах контроля.

При создании экспериментального образца виброметра использовались схемотехнические приемы, позволяющие не только ослабить влияние внешних факторов на точность амплитудно-временного преобразования резонансных колебаний, но и обеспечить его надежное функционирование при низком энергопотреблении от автономного источника питания:

- для снижения высокочастотных составляющих выходного сигнала акселерометра *ADXL105* применен активный полосовой фильтр третьего порядка с максимальным коэффициентом усиления  $K_{\Phi} \geq 50$ ;

- для упрощения виброметра в качестве компараторов использованы триггеры Шмита на логических элементах с однополярным источником питания, что позволило повысить время автономной работы прибора.

Универсальность применения цифрового виброметра для неразрушающего экспресс-контроля различных параметров железобетонных изделий обеспечивается программной реализацией функций, выполняемых микропроцессорным блоком обработки данных. При использовании виброметра для любых прочностных испытаний железобетонных конструкций требуемые значения параметров вводятся с клавиатуры, а результаты преобразования выводятся на жидкокристаллическое индикаторное табло.

**В приложениях** приведены общий вид рабочей панели программы *Math-CAD*, использованной для проведения математического моделирования затухающих колебаний, принципиальная схема и общий вид экспериментального образца прибора экспресс-контроля качества железобетонных изделий, а также документы, подтверждающие внедрение основных результатов исследований.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложены способы определения длительности периодов затухающих колебаний, обеспечивающие повышение точности измерения от трех до восьми раз при сравнительно небольших аппаратных затратах и при уменьшении времени виброчастотного контроля качества изделий.

2. Разработан алгоритм приближенного вычисления относительного логарифмического декремента затухания колебаний, характеризующийся малой методической погрешностью преобразования и сравнительной простотой выполняемых функциональных преобразований.

3. На основании проведенного математического моделирования нормированной функции колебательного процесса установлена возможность повышения точности преобразования посредством стабилизации пороговых напряжений или зоны гистерезиса при использовании простых формирователей импульсов на логических элементах.

4. Предложена универсальная структурная схема устройства контроля прочностных параметров железобетонных изделий на основе амплитудно-временного преобразования затухающих колебаний, позволяющая реализовать процессы измерения резонансной частоты и логарифмического декремента затухания при сравнительно малых аппаратурных затратах.

5. Усовершенствован способ разделения изгибных и крутильных затухающих колебаний при виброчастотном контроле параметров железобетонных конструкций, основанный на цифровом измерении и вычислении отношения периодов выходных сигналов двух вибрационных датчиков, закрепляемых на противоположных боковых сторонах изделия.

6. На основании известной связи резонансной частоты и параметров строительных конструкций предложены расчетные формулы для контроля несущей способности, жесткости, трещиностойкости и массы железобетонных изделий посредством измерения временных параметров затухающих колебаний и их сравнения с аналогичными прочностными параметрами эталонной конструкции или эквивалентной модели.

7. Для определения видов и мест расположения скрытых дефектов железобетонных изделий предложено усовершенствовать типовую методику диагностики – после ударного возбуждения резонансных колебаний в контролируемом изделии выполнять сравнение периодов колебаний и логарифмического коэффициента затухания с аналогичными динамическими параметрами эталонной конструкции при различных местах приложения нагрузки.

8. В результате проведенных исследований разработан экспериментальный образец прибора экспресс-контроля качества железобетонных изделий с оригинальным программным обеспечением, позволяющим его использовать:

- для автоматизированного допускового контроля качества конструкций балочного типа при их изготовлении в условиях производства;
- для оценки прочностных параметров эксплуатируемых строительных конструкций и зданий;
- для контроля несанкционированного доступа к охраняемым объектам.



**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Богданов Н. Г., Иванов Б. Р., Савельев С. Н. Виброчастотный контроль строительных конструкций с цифровой обработкой данных // Труды IV международной конференции и выставки "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Том 2. – М., 2002. – С. 332 – 333.

2. Богданов Н. Г., Савельев С. Н. Технические средства охраны на основе использования виброчастотного метода // Межвузовский тематический научный сборник. Вып. III. – Краснодар: КВИ, 2002. – С. 60 – 62.

3. Савельев С. Н. Цифровые системы защиты и охраны информации на основе метода виброчастотного контроля // Вооруженные силы и реформы в России. Межвузовский тематический научный сборник. Вып. II. – СПб.: ВУС, 2001. – С. 293 – 295.

4. Богданов Н. Г., Иванов Б. Р., Савельев С. Н. Цифровые системы охраны информации на основе использования виброчастотных датчиков // Труды IV межведомственной конференции "Научно-техническое и информационное обеспечение деятельности специальных служб". Том 1. – М.: ИКСИ, 2002. – С. 132 – 135.

5. Богданов Н.Г., Иванов Б. Р., Савельев С. Н. Виброчастотный метод контроля состояния охраняемых объектов // Труды XI международной конференции "Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов". Том 1. – М.: Академия управления МВД России, 2002. – С. 407 – 408.

6. Коробко В. И., Калашникова Н. Г., Савельев С. Н. Вибрационный контроль жесткости конструкций бв виде балок и пластинок // Контроль. Диагностика. – № 11(53) – М.: РОНКТД, 2002. – С. 49 – 53.

7. Богданов Н. Г., Иванов Б. Р., Савельев С. Н. Средство экспресс-контроля качества строительных конструкций с цифровой обработкой данных // Труды V международной конференции и выставки "Цифровая обработка сигналов и ее применение". Том 2. – М., 2003. – С. 481 – 483.

8. Савельев С. Н. Средство контроля состояния специальных объектов // Межвузовский тематический научный сборник. Вып. IV. – Краснодар: КВИ, 2003. – С. 164 – 166.

9. Иванов Б. Р., Савельев С. Н. Способ разделения изгибных и крутильных колебаний в железобетонных конструкциях // Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых и гражданских зданий: Материалы вторых международных научных чтений. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук РААСН, Орел: ОрелГТУ, 2003. – С. 178 – 181.

*Савельев Сергей Николаевич*

МЕТОД И СРЕДСТВО ЭКСПРЕСС-КОНТРОЛЯ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО АМПЛИТУДНО-  
ВРЕМЕННЫМ ПАРАМЕТРАМ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

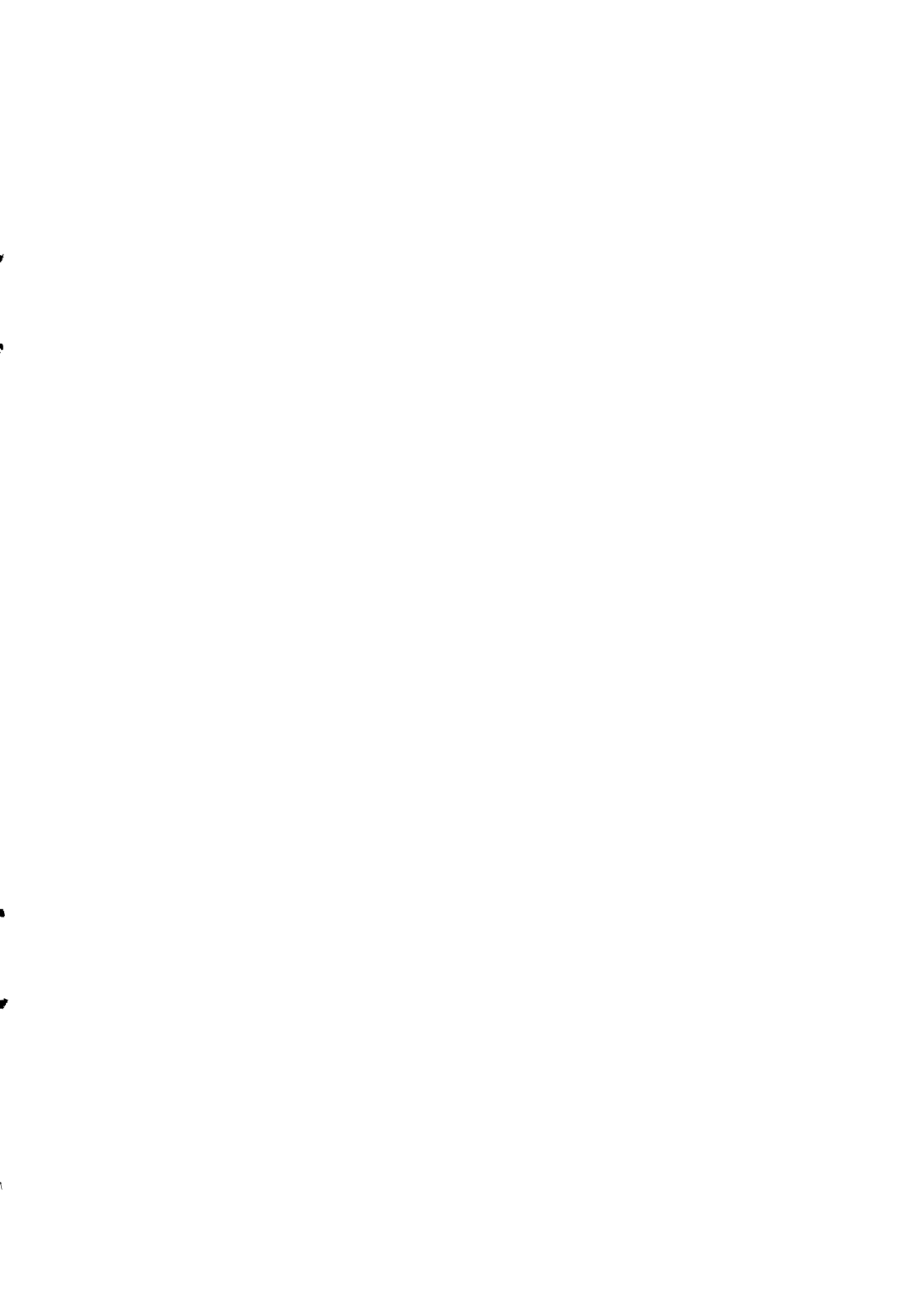
Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной  
среды, веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

Подписано в печать 17.09.2003 г. Формат 30×42/4. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 0,97. Уч.-изд. л. 1,21. Тираж 80 экз. Заказ № 325

Отпечатано в типографии Академии Спецсвязи России  
302034, г. Орел, Академия Спецсвязи России



2003-A

14877

№ 14877