

В.И. ДРАГАН, А.В. МИГЕЛЬ

Брестский государственный технический университет

## НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЛЕТНЕГО АМФИТЕАТРА В Г. ВИТЕБСКЕ

В статье рассмотрены зависимость осевого усилия от собственной частоты колебания стержня, изложена методика определения собственной частоты колебания стержня структурной оболочки в натуральных условиях, построены тарировочные зависимости «усилие-частота» для стержней поясной сетки и раскосов. Как итог статьи: произведена оценка несущей способности элементов структурной оболочки Летнего амфитеатра в г. Витебске, выявлена сходимость значений продольных усилий в стержнях структурной оболочки при двух этапах измерения.

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение собственной частоты колебания элемента конструкции, в зависимости от внутреннего осевого усилия, положено в основу проведения комплексных мероприятий по мониторингу технического состояния Летнего амфитеатра в г. Витебске, применительно к структурной системе «БрГТУ». В ходе проведенных этапов мониторинга было проанализировано свыше 250 элементов нижней поясной сетки и раскосов в опорных частях сооружения.

Любая конструкция может быть представлена в виде системы пружин, масс и демпферов. Демпферы поглощают энергию, а массы и пружины - нет. Масса и пружина образуют систему, которая имеет резонанс на характерной для нее собственной частоте. Если подобной системе сообщить энергию (например, ударить по ней), то она начнет колебаться с собственной частотой, а амплитуда вибрации будет зависеть от мощности источника энергии и от поглощения этой энергии, т.е. демпфирования, присущего самой системе. Собственная частота идеальной системы масса-пружина без демпфирования дается соотношением:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

где:

$k$  - коэффициент упругости (жесткость) пружины,

$m$  - масса.

Для призматических тел конечной жесткости, к которым относятся стержни строительной конструкции, собственная частота колебаний приводится соотношением:

$$\omega = \frac{i \cdot \pi^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot F}} \quad (2)$$

где:

$l$  - длина элемента,

$EI$  - жесткость элемента,

$\rho$  - плотность материала элемента,

$F$  - площадь поперечного сечения,

$i = 1, 2, 3, \dots$  - номер формы колебания.

Из зависимости видны следующие аналогии:  $EI$  - жесткость элемента,  $\rho F$  - масса элемента на 1 м длины.

Отсюда следует, что с увеличением жесткости увеличивается и собственная частота, а с увеличением массы собственная частота падает. Если система обладает демпфированием, а это так для всех реальных физических систем, то собственная частота будет несколько ниже рассчитанного по приведенной выше формуле значения и будет зависеть от величины демпфирования.

Из теории колебаний [1] известно о взаимосвязи собственной частоты колебаний от приложенного продольного усилия (сжимающего или растягивающего). Эта зависимость имеет следующий вид:

– для растянутых элементов

$$\omega = \frac{i^2 \cdot \pi^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot F} \cdot \left( 1 + \frac{S \cdot l^2}{i^2 \cdot EI \cdot \pi^2} \right)} \quad (3)$$

– для сжатых элементов

$$\omega = \frac{i^2 \cdot \pi^2}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{\rho \cdot F} \cdot \left( 1 - \frac{S \cdot l^2}{i^2 \cdot EI \cdot \pi^2} \right)} \quad (4)$$

$S$  - осевое усилие.

Из этой зависимости видно, что приложение растягивающего усилия вызывает увеличение значения собственной частоты, а сжимающего снижение. Данная зависимость применима только для свободного опертого стержня конечной жесткости (идеальный шарнир). В случае структурной конструкции БрГТУ данная зависимость не применима вследствие следующих основных факторов:

1. Нет идеального шарнирного закрепления стержней в узловых элементах конструкций с точки зрения свободы колебательных движений.
2. Перемещения узловых элементов структурной конструкции и как следствие упругая податливость закрепления.

Полученные расхождения собственных частот колебаний с использованием зависимости теории колебаний и лабораторными испытаниями составляют 20±25%.

## 1. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОБСТВЕННОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЯ СТЕРЖНЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Для определения собственной частоты колебаний использовалась компьютерная измерительная система анализа характеристик вибрации ВИКМА-1.

Структурная схема этой измерительной системы приведена на рисунке 1. Она включает в себя следующие основные модули:

- модуль измерения вибрации МИВ;
- модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ;
- модуль питания и развязки МПР.

Модуль измерения вибрации МИВ включает в себя два идентичных канала для измерения вибрации КИВ 1 и КИВ 2, каждый из которых состоит из датчика вибрации ДВ, приемного усилителя ПУ, генератора тока ГТ и аналого-цифрового преобразователя АЦП. Вибрация исследуемого объекта с помощью датчика вибрации ДВ, представляющего собой пьезоэлектрический акселерометр с интерфейсом ICP (тип AP98-100-01), преобразуется в электрический сигнал, который поступает на приемный ICP-усилитель ПУ, обеспечивающий требуемое смещение входа и усиление поступающего сигнала, после чего сигнал с выхода ПУ поступает на вход АЦП, выполненного на микросхеме AD1871 фирмы Analog Devices, где преобразуется в цифровую форму и далее передается в МУСИ. Частота дискретизации АЦП - около 47 кГц.

Модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ включает в себя центральное устройство управления ЦУУ, буферную память ББП, интерфейсный контроллер КИ и вспомогательный контроллер КВ. Центральное устройство управления ЦУУ выполнено на СБИС программируемой логики фирмы Altera семейства Cyclone. Оно осуществляет общее управление процессом измерений, выработку управляющих сигналов, буферизацию поступающих с АЦП данных в блоке буферной памяти ББП, выполненной на основе микросхемы динамической памяти фирмы Hitachi, а также выполняет дополнительные служебные функции. Интерфейсный контроллер КИ, выполненный на микросхеме CY7C 68013 фирмы Cypress, обеспечивает связь измерительного блока с управляющим компьютером посредством высокоскоростного стандартного интерфейса USB 2.0. Вспомогательный контроллер КВ, реализованный на микросхеме ATmega 8535 фирмы Atmel, обеспечивает выработку служебных сигналов управления для инициализации АЦП, а также синхронизирует поступление данных от АЦП в модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ.

Модуль питания и развязки МПР включает в себя блок гальванической развязки БГР и блок преобразователей напряжения БПН. Блок гальванической развязки БГР обеспечивает электрическую изоляцию входных измерительных модулей устройства от цифрового модуля управления, синхронизации и интерфейса МУСИ, электрически связанного с управляющим компьютером через интерфейс USB. Блок преобразователей напряжения БПН обеспечивает выработку всех напряжений, необходимых для питания измерительных модулей и МУСИ. Реализован БПН на DC-DC преобразователях фирмы Aimtec. Питание измерительного блока осуществляется путем подключения от AC-DC адаптера, преобразующего переменное сетевое напряжение 220 В в постоянное напряжение 7,5 В.

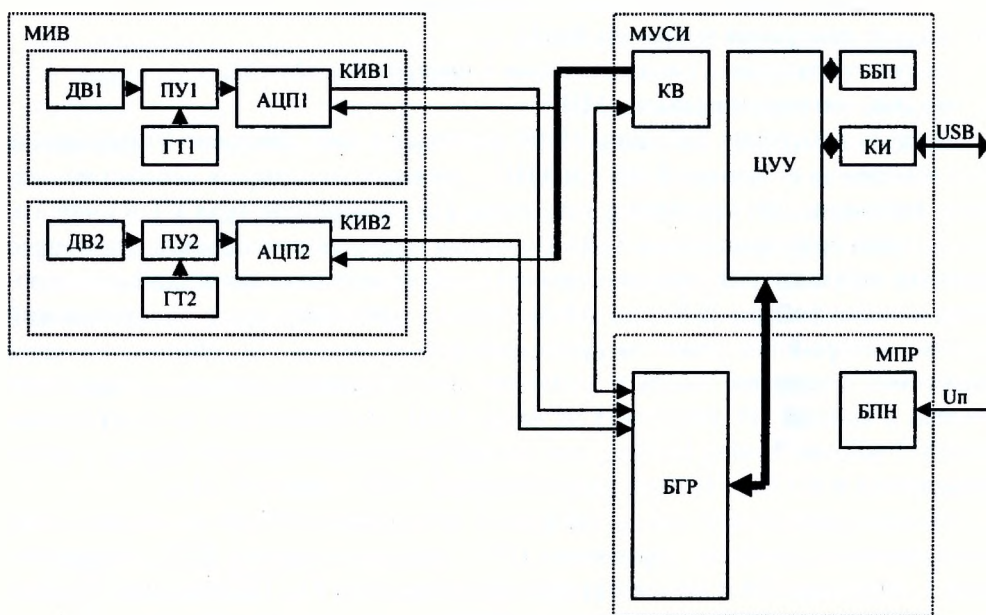


Рис. 1. Схема компьютерной измерительной системы анализа характеристик вибрации ВИКМА-1

Модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ под управлением ЭВМ производит обработку полученных от модуля измерения вибраций МИВ данных программными средствами.

Принцип действия устройства следующий: при возбуждении поперечных колебаний в образце модуль измерения вибраций МИВ передает сигнал на модуль управления, синхронизации и интерфейса МУСИ в течение заданного промежутка времени. ЭВМ считывает данные и по окончании измерения строит график колебательного движения, где по оси абсцисс откладывается время измерения, а по оси ординат виброускорение (см. рис. 3а, 3б). Далее программными средствами производится анализ полученных данных (графика колебательного движения), например построение спектра частот.

Исходя из вышесказанного, предложена методика по определению осевого усилия в элементе:

1. Вибрационный датчик ВД с магнитом крепится к элементу конструкции в средней части по длине.
2. На ЭВМ запускается процесс считывания результатов (порядка 20÷25 с), одновременно производится возбуждение поперечных колебаний, путем удара по элементу конструкции в направлении параллельном расположению датчика на расстоянии 20÷30 см от него.
3. По истечению времени считывания результатов, программным средством, поставляемым с устройством, строиться график колебательного процесса.
4. На основе полученного графика колебательного движения строиться спектр частот, по которому определяется собственная частота колебаний элемента конструкции.
5. Исходя из ранее полученных зависимостей (тарировочных графиков или теоретических формул) определяется осевое усилие в элементе конструкции.

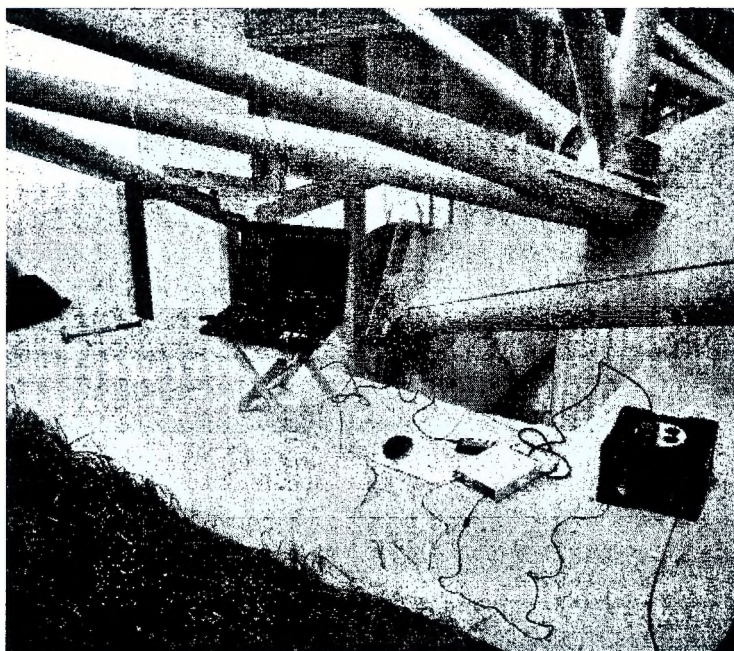


Рис. 2. Измерение собственной частоты колебания стержня структурной оболочки Летнего амфитеатра в г. Витебске

Анализ колебательного движения может производиться во временной области (графика колебательного движения) и в частотной области (спектр частот). График колебательного движения не дает четкого представления о частотных составляющих. Обычно на практике применяют частотный, или спектральный, анализ вибрационного сигнала, который позволяет определить

собственную частоту колебаний элемента. Частота и время связаны друг с другом обратно-пропорциональной зависимостью.

Обратите внимание, что на рисунке 3 частотные составляющие сигнала отделены друг от друга и явно выражены в спектре, а их уровни легко идентифицировать. Эту информацию было бы очень непросто выделить из временной реализации.

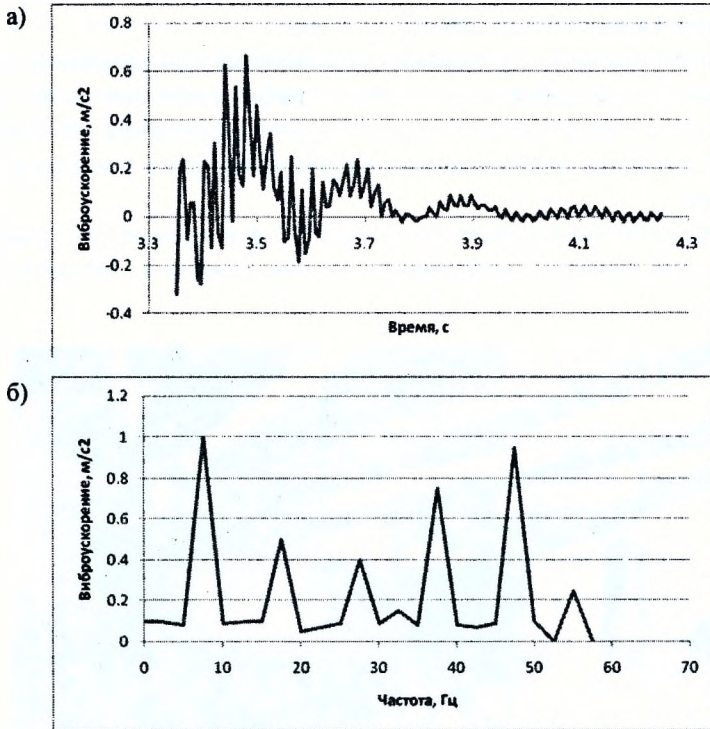


Рис. 3. График колебательного процесса: а) во временной области; б) в частотной

Ниже приведен пример временной реализации и спектра, иллюстрирующий важнейшее понятия частотного анализа и использующийся для возбуждения свободных поперечных колебаний в стержне структуры при проведении натурных измерений и лабораторных экспериментов.

Единичный импульс (удар) используется специально для возбуждения колебаний. Хотя его вибрационный отклик не будет такой классически гладкой кривой, какая приведена ниже, но тем не менее он будет непрерывным в широком частотном диапазоне и иметь пики на собственных частотах конструкции. Это означает, что удар является очень хорошим типом возбуждения для выявления собственных частот, так как его энергия распределена непрерывно в широком частотном диапазоне. Применительно к нашей методике единичный импульс используется для определения собственной частоты колебания испытываемых элементов.

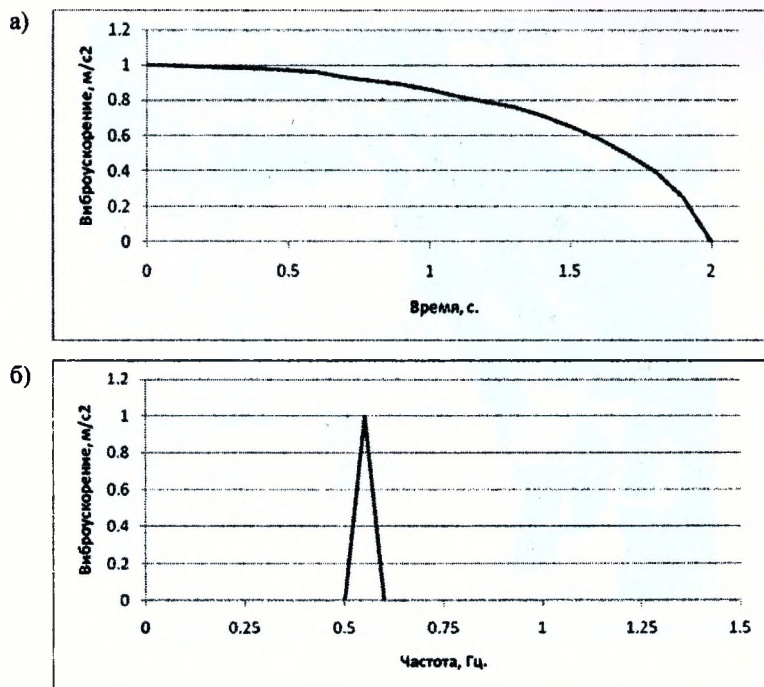


Рис. 4. График короткого импульса: а) во временной области; б) в частотной

Спектр короткого импульса (рис. 4) очень широкий, не дискретный, а непрерывный. Энергия сигнала распределена по всему частотному диапазону, а не сосредоточена на нескольких отдельных частотах. Это характерно для недетерминированных сигналов, таких как случайный шум и переходные процессы. Заметьте, что, начиная с определенной частоты, уровень равен нулю. Эта частота обратно пропорциональна длительности импульса, поэтому чем короче импульс, тем шире его частотный состав.

## 2. ПОСТРОЕНИЕ ТАРИРОВОЧНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ УСИЛИЙ В СТЕРЖНЕ ОТ ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Как отмечалось ранее, о не применимости теоретических зависимостей для оценки осевого усилия по собственной частоте колебаний, были построены тарировочные графики и получены зависимости в лабораторных условиях.

Тарировочные графики строились для стержней С3 ( $l = 2610$  мм), С4 ( $l = 2679$  мм) соответствующих нижним поясам структуры и стержня С5 ( $l = 2958$  мм), соответствующего раскосам структурной оболочки. Испытательный стенд представляет собой двутавровую балку, в которой в области между стенкой и полкой устанавливается испытуемый стержень с узлами структуры по краям, с целью имитации работы узлового соединения (рис. 5).

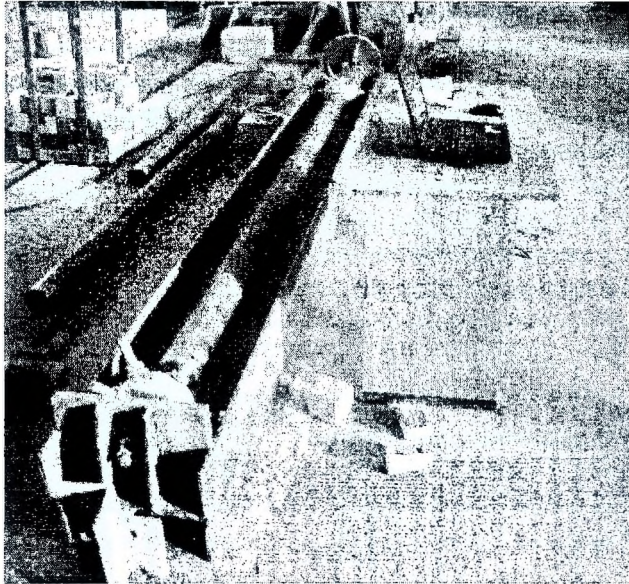


Рис. 5. Испытательный стенд для тарировки стержней структурной конструкции

Раскрепление узлов имитировало работу испытуемых стержней в составе конструкции покрытия. Нагружение стержней проводилось с шагом 50 кН. Усилие контролировалось динамометром с параллельно подсоединенным домкратом.

Измерения собственных частот колебания, на примере стержня СЗ, при контролируемой нагрузке приведены на рисунках 6-9. Результаты измерения представляют собой график колебательного процесса, где по оси абсцисс откладывается время измерения, а по оси ординат виброускорение (рис. 6, 8) и спектр частот, где по оси абсцисс откладывается частота, а по оси ординат виброускорение (рис. 7, 9).

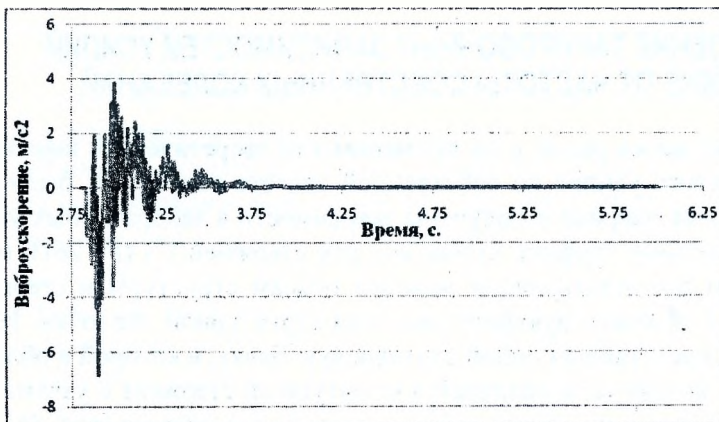


Рис. 6. График колебательного движения



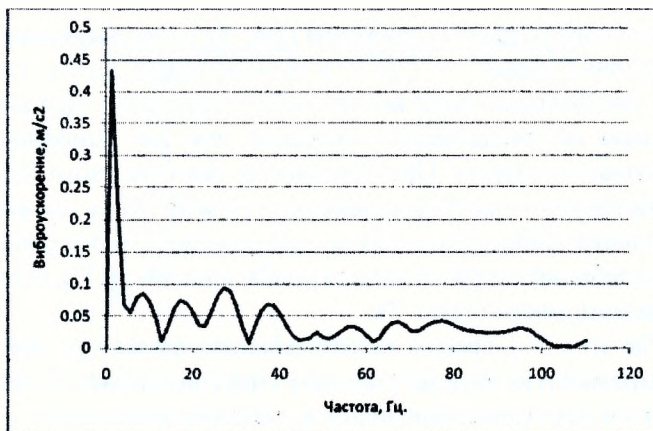


Рис. 7. Спектр частот стержня С3 в зоне импульсного возмущения

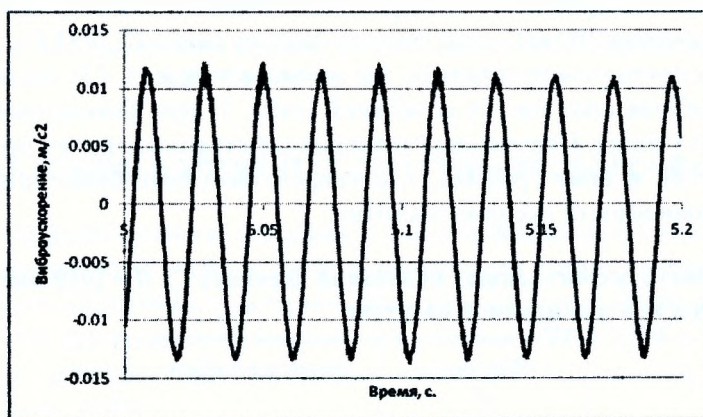


Рис. 8. График колебательного движения: зона периодических колебаний

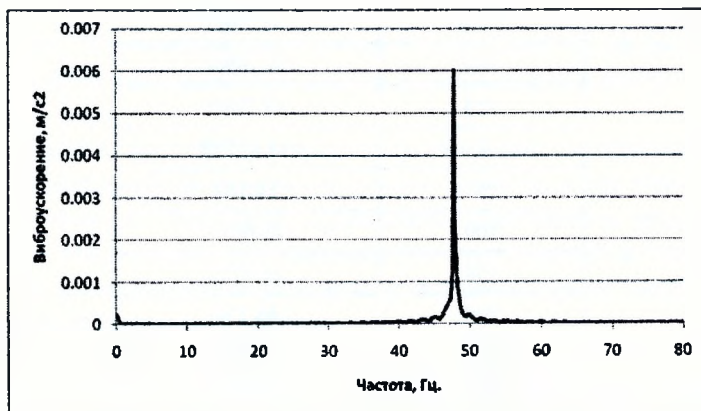


Рис. 9. Спектр частот стержня С3 в зоне синусоидальных колебаний

На графике колебательного движения (рис. 6) четко выражена зона импульсного возмущения (удара) - от 2,85 с, в момент удара, до 4 с, где колебательный процесс уже больше представляет собой синусоиду. Для анализа данный отрезок времени не представляет интереса, так как основное возмущение в этой зоне вызвано ударом. Преобладающая частота этого отрезка 0,71 Гц, и выявить собственную частоту колебания стержня очень сложно, вследствие высокого значения виброускорения от импульсного возмущения. Собственная частота колебаний стержня находится в зоне 40-50 Гц, а этот отрезок не выявлен никакими пиками (рис. 7).

Начиная где-то с 5 с, график колебательного движения уже представляет собой ярко выраженную зону затухающих синусоидальных колебаний (рис. 8), но имеет место и некоторое наложение колебаний, связанное с недостаточной плавностью кривой. Этот отрезок времени представляет практический интерес и при построении спектра позволяет определить собственную частоту колебаний. Согласно построенного спектра частот (рис. 9) для стержня С3 при нагрузке растяжения 300 кН - собственная частота равна 47,7433 Гц.

В ходе спектрального анализа, на примере стержня С3, были получены значения собственных частот колебаний (табл. 1) при фиксированном значении осевого усилия. Полученные значения собственных частот представлены на рисунке 10 в виде графика, где посредством линейной аппроксимации получена зависимость «усилие-частота».

Таблица 1. Частота собственных колебаний элемента С3 ( $l = 2610$  мм) при контролируемой нагрузке

Усилие кН	Частота колебаний Гц
-250	41,4848
-200	42,2001
-150	42,7365
-100	43,8094
-50	44,7035
0	44,43525
50	44,167
100	45,0611
150	45,9552
200	46,134
250	47,2069
300	47,7433
350	48,2798

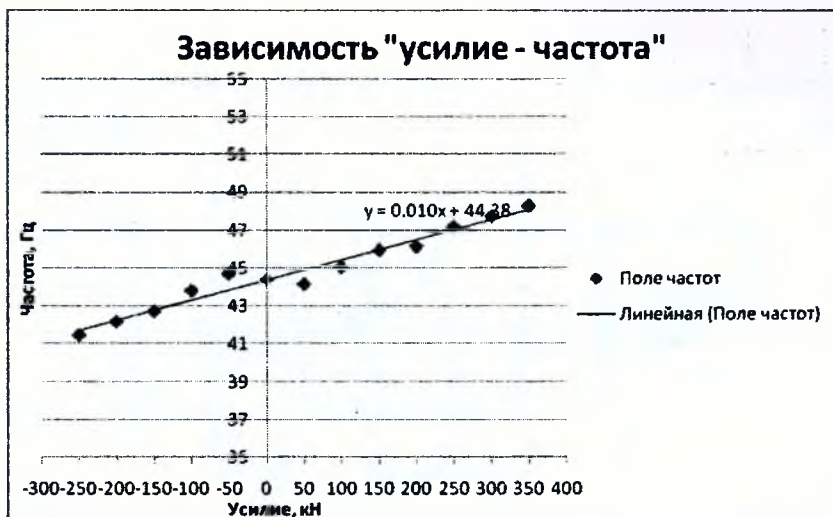


Рис. 10. Тарировочная зависимость осевого усилия от собственной частоты колебания элемента С3 ( $l = 2610$  мм)

### 3. ОЦЕНКА УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ СТРУКТУРНОЙ ОБОЛОЧКИ

Согласно разработанной методики и с использованием полученных тарировочных зависимостей «усилие-частота» произведен анализ напряженно-деформированного состояния структурной оболочки покрытия Летнего амфитеатра в г. Витебске на период технического мониторинга 2008-2009 гг. Анализ проводился: по первому этапу, на период ноября 2008 г.; по второму этапу, на период ноября 2009 г.

Оценка усилий в элементах структурной оболочки производилась для стержней нижней поясной сетки С3 ( $l = 2610$  мм), С4 ( $l = 2679$  мм) и раскосов С5 ( $l = 2958$  мм) [2]. На рисунках 11 и 12 представлены эпюры продольных сил по этапу 1 и 2 для стержней нижней поясной сетки (рис. 11) и раскосов (рис. 12) структурной оболочки. Красным цветом обозначены усилия по 1 этапу, синим цветом - по 2 этапу.

В ходе анализа эпюр продольных сил установлена достаточная сходимость, в пределах погрешности измерения, результатов по двум этапам измерения, что соответствовало примерно одинаковой температуре воздуха в период мониторинга. Имеющиеся расхождения значений усилий в стержнях связаны с различным температурным режимом и неравномерным нагревом структурной оболочки от солнечной энергии.

Оценка несущей способности элементов структурной оболочки выполнена по коэффициентам использования сечения: для растянутых элементов - по прочности, для сжатых элементов - по устойчивости. По результатам двух этапов измерения коэффициенты использования сечения для растянутых элементов находятся в интервале  $0,009 \div 0,258$ , для сжатых  $0,008 \div 0,338$ .

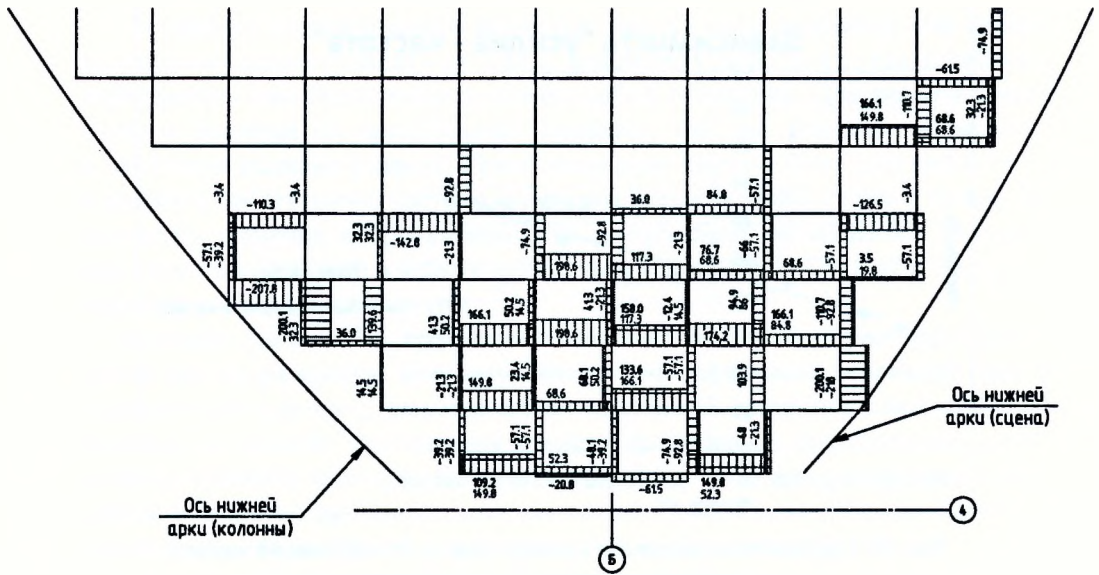


Рис. 11. Эпюры продольных сил элементов нижней поясной сетки (С3, С4), кН

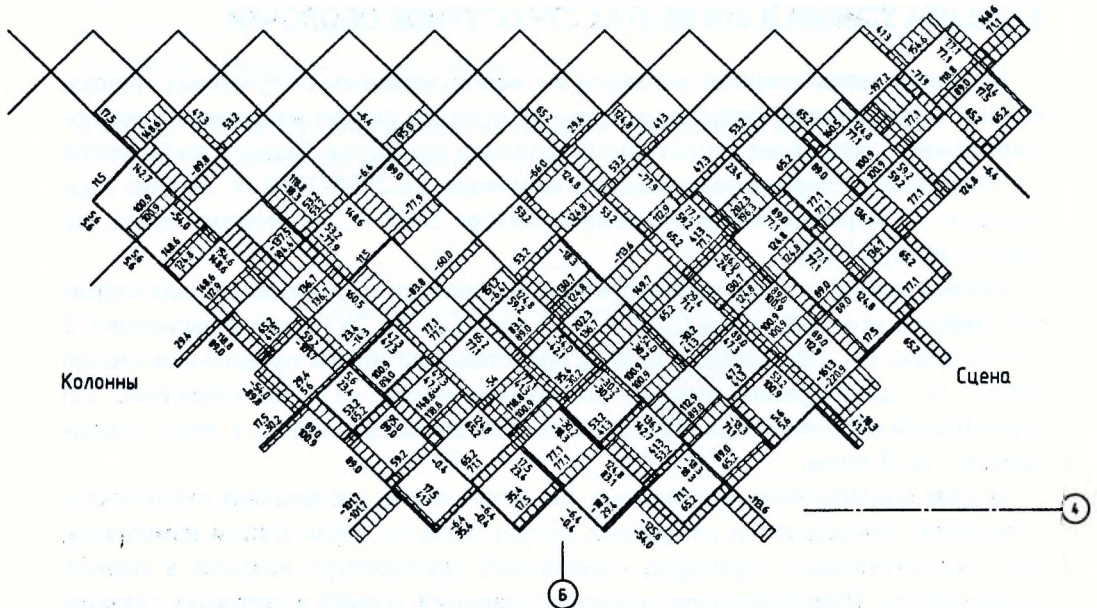


Рис. 12. Эпюры продольных сил элементов раскосной решетки (С5), кН

Усилие в элементах получены при действии следующих нагрузок: собственный вес конструкций покрытия, вес технологического оборудования, ветровая нагрузка от скоростного напора  $1 \div 3$  м/с, температурная нагрузка  $+2 \div \dots 10^\circ\text{C}$ . Основная эксплуатационная нагрузка - от веса снегового покрова - отсутствовала.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Подтверждена качественная и количественная зависимость осевого усилия в стержневом элементе конструкции от собственной частоты колебаний.
2. Разработана методика определения собственной частоты колебания элемента конструкции в натуральных условиях.
3. Построены тарировочные зависимости «усилие-частота» для стержней поясной сетки и раскосов.
4. Произведена оценка несущей способности элементов структурной оболочки, посредством определения фактических значений осевого усилия.
5. Выявлена сходимость значений продольных усилий в стержнях структурной оболочки при двух этапах измерения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У., Колебания в инженерном деле, Пер. с англ. Л.Г. Корнейчука, Под ред. Э.И. Григолюка, Машиностроение, Москва 1985, 472 с.
- [2] Мониторинг за поведением металлических конструкций покрытия Летнего амфитеатра «Славянский базар» в г. Витебске при их эксплуатации: отчет о НИР, Брестский государственный технический университет; рук. темы В.И. Драган, Брест 2008, 154 с., №08/72.