

УДК 624.072.331:534.1

Кузёмкина Г. М.

## АНАЛИЗ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРЕХШАРНИРНОЙ РАМЫ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ

В производственных зданиях часто устанавливается виброактивное оборудование широкого назначения, характерное различными частотами возбуждения. Для обеспечения надежной и безопасной работы рамных каркасов уже на стадии проектирования следует учитывать возможность резонансов, связанных с совпадением частот собственных колебаний конструкции и вынуждающих сил и моментов.

В Республике Беларусь в настоящее время в качестве несущих конструкций одноэтажных зданий используются железобетонные рамы, которые обладают рядом преимуществ перед стоечно-балочным каркасом. Потребностями производства вызвано появление составных полурам. Они оказались востребованными в тех случаях, когда возникла необходимость в увеличенных размерах здания.

Одной из таких рам является железобетонная рама с повышенными стойками, разработанная в БИИЖТе. При исследовании свойств этой рамы обнаружилось, что изменением диаметра металлической затяжки, изначально предназначенной для обеспечения необходимой несущей способности конструкции, можно при необходимости менять жесткость конструкции, что приводит к изменению частот ее собственных колебаний.

В представленной работе поставлена задача анализа влияния изменения диаметра затяжки на частоты собственных колебаний рамы, а также теоретически исследована возможность практического применения обнаруженного свойства.

С целью уточненного анализа влияния площади поперечного сечения затяжки на частоты собственных колебаний конструкции выполнены расчеты частот собственных колебаний аналитическими и численными методами. При динамических расчетах рамных конструкций аналитическими методами используют различные варианты их моделирования, которые можно разделить на две группы. Первая предполагает представление конструкции в виде системы из невесомых стержней конечной жесткости, к которым присоединены сосредоточенные массы. Второй вариант предполагает распределение массы по объему конструкции, то есть применение континуальных моделей.

Для приближенной оценки значений собственных колебаний рамы выполнялся аналитический расчет, основанный на представлении расчетной схемы рамы с повышенными стойками в виде стержневой конструкции из невесомых стержней с присоединенными массами. Поскольку стержни рамы имеют переменное поперечное сечение, то для получения реальных значений частот колебаний каждая полурама разбита на 5 участков, в центрах тяжести которых расположены точечные массы (рис. 1).

Расчет колебаний выполнялся с учетом действия нагрузок от собственного веса, длительно действующей нагрузки от веса покрытия.

Путем нахождения корней приведенной матрицы были найдены значения частот собственных колебаний исследуемой рамы, полученные путем дискретного моделирования конструкции. Они приведены в таблице 1 и стали базой для сравнения с расчетами на основе более сложных моделей.

Следующая ступень иерархии рассмотренных моделей рамы представляет собой конструкцию, состоящую из стержней с распределенной по длине массой. На этой стадии исследования была поставлена задача установления принципиальной возможности регулирования частот собственных колебаний рамной конструкции в диапазоне, допускающем возможность практического применения результатов работы.

При рассмотрении поперечных колебаний стержней использованы дифференциальные уравнения балки Эйлера-Бернулли:

$$E_i I_i \frac{d^4 y_i}{dx_i^4} + \rho_i A_i \frac{d^2 y_i}{dt^2} = 0,$$

а продольные движения сечений стальной затяжки описываются уравнением:

$$E_s A_s \frac{d^2 u_s}{dx_s^2} + \rho_s A_s \frac{d^2 u_s}{dt^2} = 0,$$

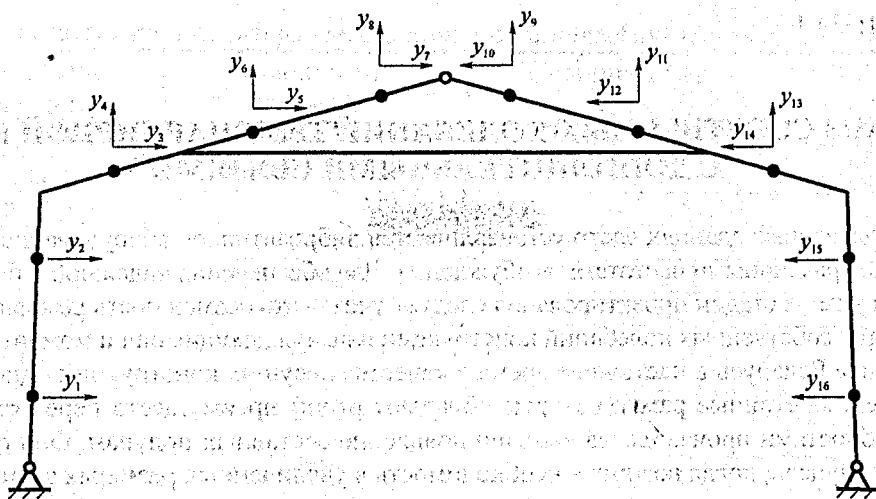


Рисунок 1 – Дискретная модель рамной конструкции

где  $y_i$  – поперечные перемещения сечений стержневой рамы;

$E_i, A_i, I_i, \rho_i$  – модули упругости, площади, моменты инерции и плотности материалов стержней;

$u_5$  – продольные перемещения сечений стальной затяжки;

$E_5, A_5, \rho_5$  – модуль упругости, площадь и плотность материала затяжки.

Выполняя решение этих уравнений методом Фурье, получаем, что формы рассматриваемых колебаний описываются выражениями:

$$y_i = C_{1i} \sin \lambda_i x + C_{2i} \cos \lambda_i x + C_{3i} \operatorname{sh} \lambda_i x + C_{4i} \operatorname{ch} \lambda_i x;$$

$$u_5 = C_{15} \sin \lambda_5 x + C_{25} \cos \lambda_5 x,$$

где  $\lambda_i = \sqrt[4]{\frac{\rho_i A_i p^2}{E_i I_i}}$  ( $i = 1-4$ ),  $\lambda_5 = p \sqrt{\frac{\rho_5}{E_5}}$ ,

$p$  – частота собственных колебаний конструкции.

С целью определения частот собственных колебаний конструкции разработана ее расчетная схема, включающая семь стержневых элементов, соединенных между собой жестко либо шарнирами (рис. 2). В соответствии с этой схемой записаны граничные условия, характеризующие геометрические и силовые варианты сопряжения элементов конструкции. С целью снижения порядка определителя, составленного из коэффициентов при постоянных интегрирования, начала отсчета координат были совмещены с шарнирами. Это позволило довести порядок определителя до 32 вместо 38. В результате приравнивания определителя к нулю получены значения частот колебаний конструкции.

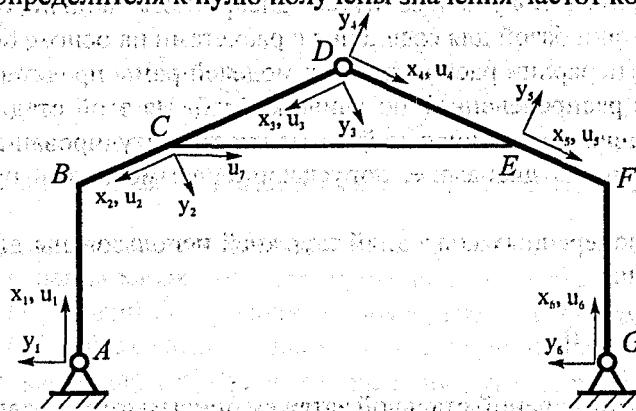


Рисунок 2 – Расчетная схема рамы с регулируемой жесткостью

Динамические расчеты, выполненные на основе аналитических методов исследований рамных конструкций, имели весьма существенный недостаток. Он заключался в том, что при создании расчетных схем конструкции пришлось заменять стержни с переменным поперечным сечением стерж-

ниями постоянного поперечного сечения. Кроме того, не учитывался характер распределения арматуры по поперечным сечениям стойки и ригеля. Все это приводило к погрешностям результатов.

С целью более точного учета особенностей конструкции при расчете частот ее собственных колебаний было принято решение о применении метода конечных элементов. На основе подхода, реализованного в многоцелевой программе проектирования и анализа ANSYS, выполнены расчеты частот собственных колебаний исследуемой рамы с настраиваемой жесткостью. Модальный анализ позволил получить значения собственных частот и выявить фундаментальные формы колебаний железобетонной рамы.

Выполнено сравнение значений частот колебаний конструкции, рассчитанных разными методами. В таблице 1 приведены значения восьми низших частот собственных колебаний конструкции, найденных аналитическими методами и методом конечных элементов. Анализ результатов, полученных различными методами, показывает достаточно высокую степень совпадения первой и второй частот. Погрешности вычисления частот высших форм колебаний обусловлены различной степенью детализации при моделировании рамы.

Таблица 1 – Частоты собственных колебаний рамы, Гц

Виды моделей		Формы колебаний							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Аналитические	С дискретными массами	0,69	2,45	4,01	5,75	10,06	10,3	14,29	18,39
	С распределенными массами	0,70	2,52	4,12	5,86	10,62	10,81	16,33	18,24
Конечно-элементные	С распределенной по объему арматурой	0,71	2,66	4,49	6,62	11,28	11,45	18,69	20,66
	Со стержневой моделью арматуры	0,71	2,65	4,48	6,60	11,26	11,42	18,64	20,61

В результате исследования были выполнены расчеты частот собственных колебаний конструкции с учетом изменения площади поперечного сечения затяжки. На рисунке 3 приведен график, иллюстрирующий, что частоты колебаний, соответствующие обратно симметричным формам, почти не зависят от диаметра затяжки. В то же время частоты симметричных форм колебаний изменяются на 40% и более. Нормативы предусматривают, что частоты собственных колебаний и вынуждающих сил должны отличаться не менее чем на 20 % от частоты первой формы колебаний. Полученные результаты позволили сделать вывод о возможности значительного повышения частот собственных колебаний симметричных форм изменением диаметра работающего сечения затяжки.

Для того чтобы получить возможность изменения обратно симметричных форм колебаний, предложено установить дополнительные затяжки. Разработана расчетная схема рамы с двумя затяжками, соединяющими стыки Г-образных и линейных элементов с противоположными карнизными узлами. Кроме того, предложена схема, предполагающая использование затяжки в качестве внешней связи, соединяющей карнизный узел с основанием, как это представлено на рис. 4.

В табл. 2 содержатся значения частот собственных колебаний конструкции, полученные при разных вариантах постановки затяжек. Результаты расчетов показывают, что введение дополнительных связей позволяет существенно повысить частоту собственных колебаний. Таким образом, изменяя расположение затяжек, можно при необходимости менять частоты собственных колебаний железобетонных рам таким образом, чтобы они достаточно сильно отличались от частот колебаний, возбуждаемых виброактивным оборудованием.

Выполнен анализ влияния диаметров дополнительных затяжек на частоты колебаний конструкции. На рис. 5 приведены графики частот собственных колебаний рамы в зависимости от диаметров затяжек для случая одновременного изменения размеров поперечного сечения основной и дополнительных связей.

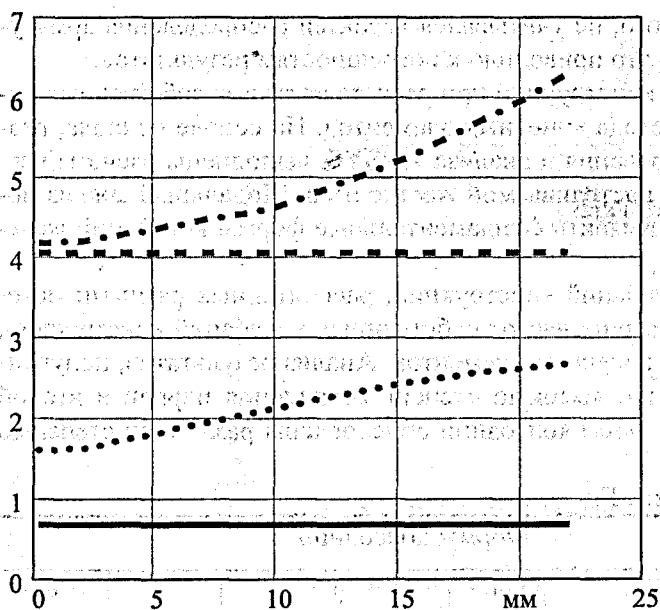


Рисунок 3 – Зависимость частот колебаний рамы с регулируемой жесткостью от диаметра затяжки

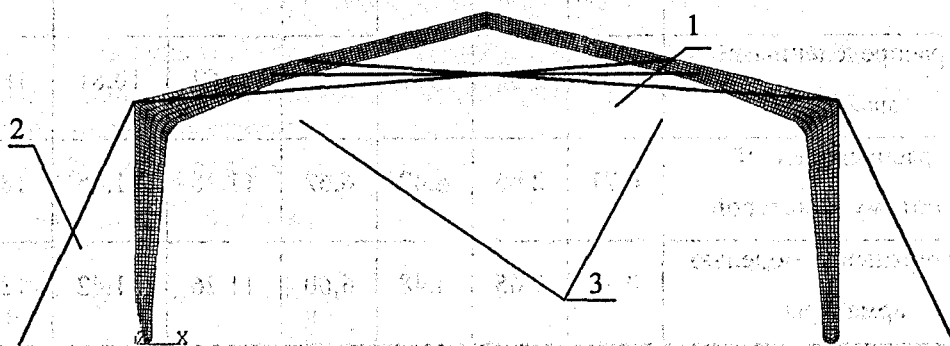


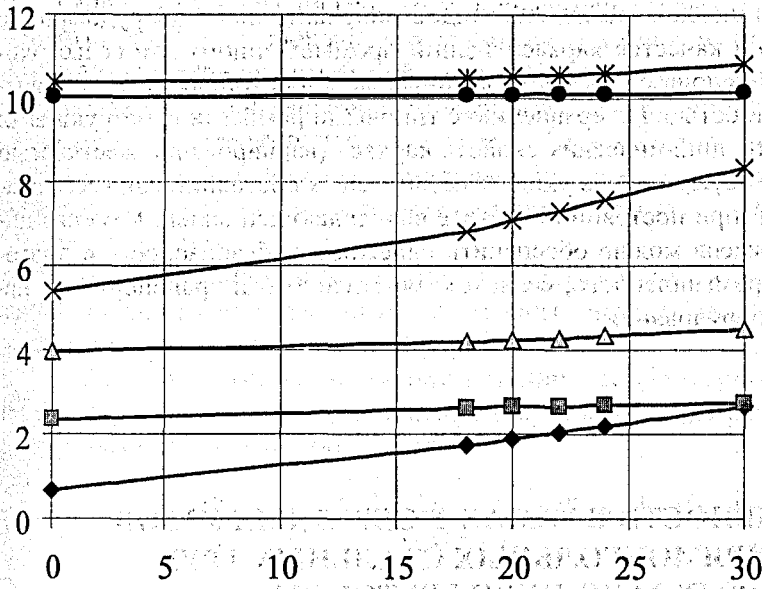
Рисунок 4 – Схемы расположения дополнительных затяжек

Таблица 2 – Частоты собственных колебаний при установке дополнительных затяжек, Гц

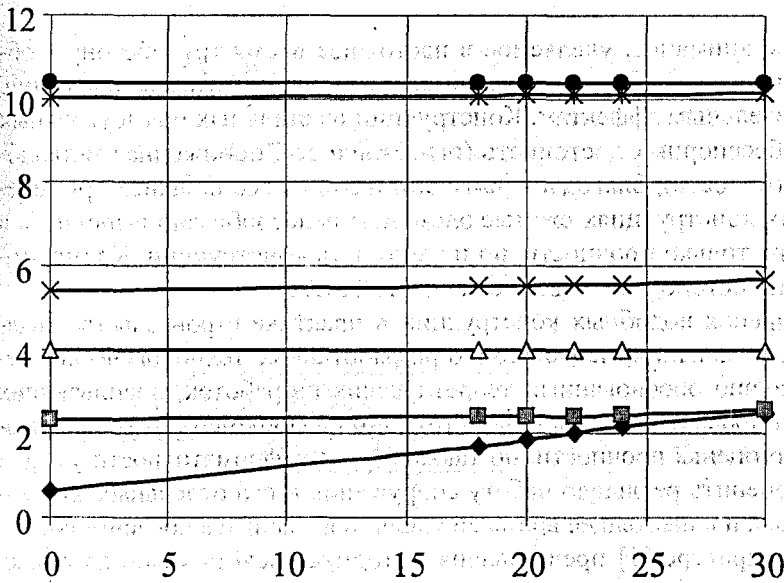
Варианты постановки затяжек	$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	$\nu_4$
Затяжка 1	0.63341	2.3453	3.9763	5.3942
Затяжки 1 и 2	1.8631	2.4111	3.9872	5.5313
Затяжки 1 и 3	0.69098	2.6168	4.5265	6.9612
Затяжки 1, 2, 3	1.8959	2.6386	4.5314	7.0579

Одновременное увеличение диаметров затяжек 1, 2 и 3 (рисунок 5) приводит к существенному увеличению собственных частот первой и третьей форм колебаний железобетонной рамы. При этом остальные частоты колебаний конструкции практически не изменяются. При одновременном увеличении диаметров затяжек 1 и 2 происходит рост только нижней частоты собственных колебаний (рисунок 6). Результаты расчетов показали, что увеличением диаметра затяжки 2 от 0 до 30 мм достигается рост значения нижней частоты колебаний рамы с 0,63 до 2,47 Гц (рисунок 7). Это позволяет сделать вывод о возможности настройки нижней частоты колебаний конструкции на нерезонансные режимы. Причем, основной вклад в изменение частоты колебаний вносит именно дополнительная затяжка 2.

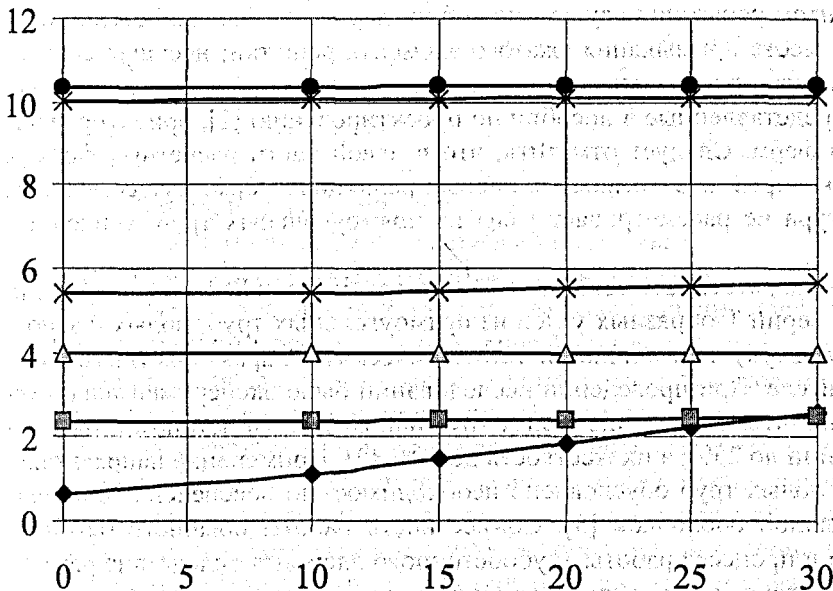
В случае наличия в различных частях здания видов виброактивного оборудования, характерных различными частотами возбуждения, можно отстроить от резонансов каждую такую часть, независимо от соседних. При этом различные комбинации дополнительных связей и изменение их диаметров приведут к изменению частот собственных колебаний рам. Иначе говоря, какие-то рамы можно сделать с увеличенными частотами свободных колебаний, а иные – наоборот, в соответствии с конкретной ситуацией. При этом каждая часть здания окажется настроенной на нерезонансные колебания и не потеряет несущей способности.



**Рисунок 5 – Зависимость частот собственных колебаний рамы от диаметров затяжек 1, 2 и 3**



**Рисунок 6 – Зависимость частот собственных колебаний рамы от диаметров затяжек 1 и 2**



**Рисунок 7 – Влияние изменения диаметра затяжки 2 на частоты колебаний конструкции**

Таким образом, если в здании установлено несколько видов виброактивного оборудования с различными частотами возбуждения, то в качестве каркаса зданий промышленного или сельскохозяйственного назначения целесообразно использовать предложенные железобетонные рамы с повышенными стойками и регулируемой жесткостью. По сравнению с типовыми рамными конструкциями они имеют узлы, допускающие изменения динамических свойств каркаса (варьирование жесткостью в процессе эксплуатации), что позволяет осуществлять уход от резонансных состояний как всего здания в целом, так и отдельных его частей (при постоянной частоте вынуждающей силы). Изменяя динамические характеристики рамных каркасов можно обеспечить надежность, безопасность и долговечность их использования в зданиях промышленного, сельскохозяйственного и транспортного назначения при наличии виброактивного оборудования.

УДК 624.078.416:696.133

Лебедь В.А.

### К ОЦЕНКЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ В РАМАХ Т-ОБРАЗНЫХ УЗЛОВ (ПАРАМЕТР $\beta \leq 0.8$ ) ИЗ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ ТРУБ, СТОЙКИ КОТОРЫХ ЗАПОЛНЕНЫ БЕТОНОМ

Вполне оправдано то повышенное внимание, уделяемое в настоящее время трубобетону в области мостовых конструкций, следует также отметить, что и при высотном строительстве внедрение трубобетонных элементов ведет к значительным эффектам. Конструкции из стальных прямоугольных труб заполненных бетоном имеют ряд бесспорных достоинств (огнестойкость, пониженная металлоемкость, коррозионная стойкость, эстетичность), благодаря чему они находят всё большее применение в практике строительства. В данных конструкциях сжатые элементы целесообразно выполнять в трубобетоне, что позволяет увеличить не только прочность, но и жесткость конструкции. Кроме этого, заполнение полых труб в конструкции бетоном повышает её огнестойкость.

Сдерживающими факторами внедрения подобных конструкций в практике строительства являются: недостаток экспериментальных исследований, недостаточно разработанные технологические решения и как следствие – недостаток научно обоснованных теоретических разработок, оценивающих несущую способность конструкций. При проведении расчета конструкции на современном уровне правилом хорошего тона является не только оценка прочности, но также и учет деформативности узлов в конструкции, поскольку это позволяет оценить реальную работу сооружения и его отдельных элементов. Данная проблема весьма перспективна и в настоящее время ей уделяется значительное внимание.

В отечественной нормативной литературе [1] представлена методика расчёта узлов из полых прямоугольных труб. Соответственно нормами учтено: продавливание (выравнивание) участка стенки пояса, контактирующего с элементом решетки; несущая способность участка боковой стенки пояса (параллельной плоскости узла) в месте примыкания сжатого элемента решетки; несущая способность элемента решетки в зоне примыкания его к поясу; прочность сварных швов прикрепления элемента решетки к поясу. Формулы, представленные в пособии по проектированию [1], ориентированы в большей степени на расчет узлов ферм. Следует отметить, что в левой части расчетных формул присутствует изгибающий момент, который отсутствовал в первых редакциях норм. Существующая отечественная нормативная литература не рассматривает узлы из прямоугольных труб, усиленных напрягающим бетоном.

В лабораториях Брестского государственного технического университета и Белостокской политехники было проведено испытание серии Т-образных узлов из прямоугольных труб, полых и заполненных напрягающим бетоном, (17 штук) с различными геометрическими характеристиками при действии изгибающего момента в ригеле. При проведении исследований было экспериментально установлено и теоретически обосновано, что, заполнение полых труб напрягающим бетоном позволяет повысить прочность узлов конструкций до 25%, а их жесткость до 60% [2]. Применение напрягающего бетона для заполнения стальных полых труб обусловлено необходимостью обеспечения совместной работы бетонного ядра со стальной оболочкой [3]. Совместность работы обычного бетона и стальной трубы может утрачиваться в процессе работы трубобетонного элемента вследствие различных коэффициентов Пуассона для бетона и стали, а также из-за реологических явлений (явление усадки), протекающих в бетонном ядре [4].