

Новочеркасский государственный технический университет
Волгодонский институт

РГБ ОД

- 8 СЕН 1998

На правах рукописи

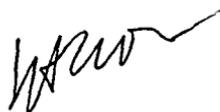
Наугольников Владимир Андреевич

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ КРАНОВ
МЕТОДАМИ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

Специальность 05.05.05 Подъёмно-транспортные машины

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Волгодонск 1998

Работа выполнена в Новочеркасском государственном
техническом университете и Волгодонском институте НГТУ.

Научные руководители - доктор технических наук,
профессор Воронцов Г.В.,

доктор технических наук,
профессор Панасенко Н.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Короткий А.А.

кандидат технических наук,
доцент Дербенёв Н. А.

Ведущее предприятие - ОАО ЭМК - "АТОММАШ",
г.Волгодонск.

Защита состоится 18 сентября 1998 г. в 10⁰⁰ часов
на заседании специализированного Совета К 063.30.11
в Новочеркасском государственном техническом университете по
адресу: 346400 г. Новочеркасск, ул. Просвящения, 132.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах,
заверенные печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
НГТУ.

Телефон для справок

Автореферат разослан 15 августа 1998 г.

Учёный секретарь специализированного совета кандидат технических наук,
доцент Ерейский В.Д.

Назначение работы. Развитие строительной индустрии и атомной энергетики, существенное расширение регионов с повышенными требованиями к грузоподъемным кранам по сейсмостойкости поставило задачи создания высоконадежных металлических конструкций (м/к), сооружений и атомных станций (АС), имеющих качественно новый уровень технической и радиационной безопасности. Неотъемлемыми составными частями многих крановых и строительных конструкций и сооружений служат пространственные металлические стержневые системы, имеющие сложную конфигурацию и значительное число элементов. К обязательному набору оборудования любой АС относится подъемно-транспортное оборудование (ПТО). В процессе эксплуатации крановые м/к и оборудование АС могут подвергнуться различным внешним воздействиям, начиная от простейших статических, до сложных вибрационных и сейсмических нагрузок (ВиСН). С целью максимального удешевления конструкции, с одной стороны, и обеспечения безопасности ее функционирования с другой, проектировщик обязан из множества вариантов конструкций выбрать рациональный. При исследовании математических моделей (ММ) м/к и сооружений требуются эффективные методы расчёта, позволяющие изучать напряжённо-деформированное состояние (НДС) их действительной работы как в линейной постановке, так и с учетом проявления существенных нелинейностей.

Актуальность темы обуславливается практической потребностью в разработке и реализации эффективных методов расчета нелинейных стержневых пространственных конструкций на ВиСН, поскольку в существующих нормативных документах по расчёту м/к недостаточно развиты методы расчета нелинейных м/к как систем со многими степенями свободы. Эти методы должны дополнять и расширять возможности существующих, заложенных в действующих СНиП 2-7-81¹(1995г.) и нормах расчета ПТО ПБ 10-14-92.

Исследования, положенные в основу диссертационной работы, выполнены в рамках научно-технической программы "Атоммаш" СКНЦ ВШ, федеральной целевой программы "Обращение с радиоактивными отходами и отработанными ядерными материалами, их утилизация и захоронение на 1996-2005 годы."(постановление Правительства Российской Федерации от 23

октября 1995 г. № 1030 г. Москва) в Новочеркасском государственном техническом университете и Волгодонском институте этого университета.

Цель работы заключается в совершенствовании ММ эксплуатационных состояний м/к кранов, описывающих их как сложные пространственные геометрически и физически нелинейные стержневые системы, подверженные статическим, ВиСН с учётом эксплуатационных нагрузок; развитию теоретических положений методов гармонической и эквивалентной линеаризаций (ГЛ и ЭЛ) применительно к задачам динамической прочности и сейсмостойкости м/к кранов и ПТО АС; разработке и реализации на их основе практически эффективных алгоритмов и компьютерных программ расчёта геометрически и физически нелинейных м/к кранов при статических, ВиСН.

Методика исследования. Задачи, поставленные в диссертационной работе, решены на основе применения итерационных методов ГЛ и ЭЛ, метода конечных элементов (МКЭ) в форме перемещений; теории случайных функций, теории сейсмостойкости и надёжности конструкций, теории нелинейных колебаний и устойчивости движения и численных математических методов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в более точном описании и расчёте характеристик действительной работы м/к кранов за счёт перехода от традиционных линейных моделей к нелинейным расчётным динамическим моделям (НРДМ) с большим числом обобщённых координат (200-400 ОК) и формировании нелинейных уравнений движения; развитии методов ГЛ и ЭЛ применительно к нелинейным задачам динамики м/к кранов; развитии методов расчета для разветвленных пространственных стержневых конструкций и реализации их в виде алгоритмов и комплексов программ для компьютеров, а также практических результатах, полученных при компьютерном моделировании:

- НДС при статических и температурных воздействиях геометрически нелинейных м/к кранов;
- частот и форм (на основе метода обратной итерации) свободных колебаний с учетом распределенной массы, геометрической нелинейности конструкций и влияния статических нагрузок. Решение частичной проблемы собственных значений;

- выявление условий возбуждения автоколебаний для их устранения или ограничения; определение характеристик авто- и вынужденных полигармонических нелинейных колебаний с последующим исследованием устойчивости этих режимов, влияния комбинационных резонансов и колебательных составляющих продольных сил при детерминированных вибрационных нагрузках на НДС м/к кранов;

- параметров стохастических колебаний и исследования устойчивости колебательных режимов при стационарных и нестационарных воздействиях. В решённых задачах стационарные случайные процессы воздействия и отклика м/к представлялись либо в интегральной канонической форме, либо с помощью интерполяционных полиномов и случайных векторов. Нестационарные случайные процессы представлялись в виде произведения детерминированной огибающей и стационарного случайного процесса, либо суммы полигармонического математического ожидания и стационарного случайного процесса, либо с помощью интерполяционных полиномов и случайных векторов. Предусмотрен учёт разности воздействий для протяжённых м/к кранов.

Практическая значимость. Реализованные в виде программ для персонального компьютера и ЕС ЭВМ методики и алгоритмы расчёта НДС при статических нагрузках, частот и форм свободных колебаний, амплитудно-фазовых характеристик вынужденных колебаний позволяют изучать более приближённую к действительности работу м/к кранов за счёт более совершенных ММ. Компьютерные программы формирования и расчёта НРДМ апробированы на экспериментальной модели и реальных конструкциях перегрузочной машины АЭС с ВВЭР-1000, мостового и полукранового кранов Разданской ГРЭС (Армения). В алгоритмах расчёта заложена возможность учёта: распределённой массы стержня; элементов с нелинейными характеристиками от обобщённых перемещений и скоростей; влияния статических нагрузок и вибрационных составляющих продольных сил.

Эффективность предложенных алгоритмов и программ позволяет существенно сократить сроки проектных работ, повысить надёжность работы и снизить материалоемкость конструкций и оборудования. Часть разработанных алгоритмов и программ была использована при разработке методического обеспечения нормативных требований к кранам.

Достоверность полученных результатов достигнута:

- математическим моделированием колебаний КЭ точным дифференциальным уравнением, учитывающим распределённую массу и геометрическую нелинейность КЭ;
- выполнением вычислительных экспериментов по оценке точности вычислений и скорости сходимости предложенных алгоритмов;
- сравнением результатов вычислительных экспериментов с аналитическими решениями, расчётными значениями полученные другими авторами и экспериментальными данными;
- постановкой эксперимента на пространственной стержневой модели с различными типами закрепления узлов и видами внешних воздействий.

Реализация результатов работы. Разработанные алгоритмы и программы апробированы на расчетах реальных конструкций перегрузочных машин АЭС с реактором ВВЭР-1000, эксплуатационного крана ВВЭР-440 (ПО "Кран"), крана узла свежего ядерного топлива г/п 16/3,2 т. для АЭС "Хурагуа", полукозлового крана Разданской ГРЭС, трубопроводных систем управления защиты реактора ВВЭР-1000 (Волгодонский филиал ВНИИАМ), первого контура реактора ВВЭР-1000 (ПО "Атоммаш"). Результаты расчетов использовались названными организациями при проектировании оборудования в сейсмостойком исполнении. Разработанные алгоритмы и программы для ЭВМ частично вошли в нормативный документ РД 24.035.04-89. Нормы расчета на сейсмостойкость подъемно-транспортного оборудования атомных станций.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на Всесоюзной научно-технической конференции "Прогрессивные технологические процессы в атомном машиностроении" (1982 г.), X научно-практической конференции молодых ученых и специалистов НИИ (1985 г.), IX-XII научных конференциях ВИ НГТУ, отраслевой (Милатомэнергопром) научно-технической конференции "Методы анализа брака при производстве изделий машиностроения" (1990 г.), Российской научно-практической конференции "Проблемы технической безопасности подъемных сооружений" (1995 г.), международной научно-технической конференции "Современные проблемы машиностроения и технический прогресс" (1996 г.).

Практические результаты работы обсуждены на научно-технических советах ПО "Атоммаш", ПО "Кран", Волгодонского филиала ВНИИАМ. Основные положения диссертационной работы обсуждались и рецензировались на кафедрах строительной механики и сопротивления материалов и ПТМ НГТУ (г.Новочеркасск) и прикладной механики ВИ НГТУ (г.Волгодонск).

На защиту выносятся:

- ММ м/к кранов, содержащая большое число ОК и сформированная с учётом распределённой массы КЭ, геометрической нелинейности м/к, сухого трения в опорных узлах крана и грузовой тележки, нелинейности демпфирующих устройств гасящих колебания кабины крановщика и м/к крана, работу электродвигателя на нелинейной ветви механической характеристики ;
- алгоритмы формирования нелинейных дифференциальных уравнений (ДУ) движения м/к кранов МКЭ на основе точного решения ДУ для КЭ;
- методики и алгоритмы определения критических значений параметров м/к и решения нелинейных ДУ методами ГЛ и ЭЛ, развитыми применительно к ММ движения м/к кранов;
- компьютерные программы реализующие методику инженерного поверочного расчёта для нелинейных м/к;
- результаты экспериментов на пространственной стержневой металлической экспериментальной установке при статических нагрузках, свободных и вынужденных колебаниях;
- результаты вычислительных экспериментов на НРДМ реальных м/к кранов при свободных и вынужденных колебаниях.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 16 научных статьях и тезисах докладов Всесоюзных, Российских и международных конференций, нормативном документе РД 24.035.04-89. Нормы расчета на сейсмостойкость ПТО АС, 6 научных отчетах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов; списка литературы из 167 наименований и приложения. Работа содержит 204 страницы машинописного текста, 20 таблиц и 48 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность темы исследования, определены цели и задачи работы, приведены сведения составляющие научную новизну, практическую ценность работы и являющиеся предметом защиты.

В первой главе выполнен обзор методов расчета нелинейных колебаний и работ посвященных современному состоянию теории сейсмостойкости конструкций и сооружений.

Исследованию нелинейных колебаний и расчету конструкций и сооружений при детерминированных и случайных воздействиях посвящено большое число теоретических и экспериментальных работ отечественных и зарубежных авторов, а именно А.А.Андропова, Ю.К.Амбриашвили, Я.М.Айзенберга, Г.Аугусти, М.Ф.Барнштейна, В.В.Болотина, В.Л.Боголюбова, Г.В.Воронцова, Р.Ф.Ганиева, А.С.Гусева, И.И.Гольденבלата, В.М.Дорофеева, В.К.Егупова, А.М.Жарова, А.З.Зарифьяна, О.Зенкевича, К.С.Завриева, И.Е.Казакова, Р.Клафа, М.З.Козловского, В.О.Кононенко, И.Л.Корчинского, Н.М.Крылова, И.Ломница, И.Г.Малкина, Ю.П.Назарова, Н.А.Николаенко, Ю.В.Осетинского, Я.Г.Пановко, А.А.Петрова, Е.П.Попова, В.С.Пугачева, С.В.Полякова, В.А.Постнова, Э.Розенблюта, Л.М.Резникова, Д.А.Светлицкого, А.А.Свешникова, А.Тондла, В.Ф.Ушакова, Г.Шмидта, Г.Хаузнера и других.

В совершенствовании методов расчёта подъёмно-транспортной техники доминирующую роль сыграли работы отечественных учёных М.П.Александрова, П.Е.Богуславского, В.И.Брауде, А.В.Вершинского, М.М.Гохберга, А.И.Дукельского, А.А.Зарецкого, С.А.Казака, Г.П.Ксюнина, А.А.Короткого, Б.С.Ковальского, М.С.Комарова, Н.А.Лобова, А.Г.Ланга, Н.Н.Панасенко, М.Н.Хальфина и других.

Среди применяемых в настоящее время способов расчета нелинейных колебаний следует выделить три основных направления:

- 1) использование приближенных качественных и асимптотических методов решения нелинейных дифференциальных уравнений;
- 2) исследования, основанные на численном решении нелинейных дифференциальных уравнений движения с последующими вычислениями оценок НДС и проверкой устойчивости;
- 3) применение методов приведения исходных уравнений к линеаризованным соотношениям, позволяющим при расчете нелинейных

конструкций реализовать хорошо разработанные методы расчёта линейно деформируемых систем.

Выполнен сравнительный анализ различных методов решения нелинейных задач теории колебаний и теории сейсмостойкости; проанализировано развитие математических моделей пространственных металлических конструкций и сооружений, а также моделей внешних воздействий.

Отмечено, что наиболее существенными недостатками, ограничивающим применение качественных, асимптотических и метода ортогонализации "в среднем" к исследованию колебаний нелинейных систем со многими степенями свободы является высокий порядок нелинейных алгебраических уравнений; невозможность уточнения частот колебаний; сложность исследования устойчивости решения.

Недостатки "прямых" методов особенно остро проявляются при вероятностном подходе к расчетам:

- большие затраты машинного времени, обусловленные сложностью решения краевых задач для большого числа выборочных реализаций случайных процессов, воздействующих на M/k ;

- сложность оценки точности полученных результатов и обоснования сходимости и устойчивости решений, без чего невозможно ответить на вопрос, что неустойчиво - алгоритм или конструкция;

- необходимость обработки множества реализаций выходных процессов с целью получения их статистических характеристик - моментов различных порядков, корреляционных функций, вероятностей выбросов и пр.;

- отсутствие гарантии того, что какие-либо, в частности, экстремальные условия эксплуатации конструкции оказались неучтёнными;

- сложность оценок стабильности, колебательности и других динамических характеристик конструкции.

Достоинством методов линеаризации нелинейных дифференциальных уравнений движения систем являются:

- сравнительная простота алгоритмов расчета амплитудно-фазовых характеристик колебаний и проверки устойчивости стационарных режимов движения систем;

- возможность предварительной обработки множества реализаций и математического моделирования случайных воздействий;

-проведение единичного расчета системы и возможность получения статистических характеристик движения системы и оценки ее надежности без многократной обработки ансамбля реализаций внешних воздействий;

-использование линеаризованных матриц жесткости и других при-
вычных в линейной теории операторов, понятий и оценок.

Описаны основные нелинейности м/к кранов в эксплуатационных режимах работы. Поставлена задача компьютерного исследования динамической прочности и устойчивости колебательных режимов м/к кранов и обоснован выбор метода линеаризации для её решения.

Во второй главе на основе МКЭ в перемещениях разработаны ММ пространственных м/к кранов и ПТО АС. Рассмотрены дискретно-континуальные КЭ с распределённой массой. Для задач статики в работе использовались балочные функции, полученные на основе точного решения дифференциального уравнения статического равновесия, положенные в основу деформационных методов расчета со сжато (растянуто)-изогнутыми элементами. Приведены матрицы жёсткости для геометрически нелинейного КЭ. Матрицы жёсткости линейно-упругого КЭ получаются из деформационных при равенстве нулю продольных сил в КЭ. В задачах динамики перемещение межузловых сечений описывается точным решением дифференциального уравнения колебания сжатого КЭ с учётом сдвиговых деформаций и распределённой массы, поскольку традиционно используемые полиномы Эрмита корректно применимы в задачах статики и лишь приближенно в задачах динамики. На основе этого решения была составлена динамическая матрица жесткости. Компоненты этой матрицы зависят от частоты колебаний. Для жестко защемленного КЭ матрицы жесткости вычисляются по формулам

$$[h_d(\omega)]_{12 \times 12}^{jk} = \begin{bmatrix} [h_d(\omega)]_{6 \times 6}^{jj} & [h_d(\omega)]_{6 \times 6}^{jk} \\ [h_d(\omega)]_{6 \times 6}^{kj} & [h_d(\omega)]_{6 \times 6}^{kk} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$[h_g(\omega)]_{6 \times 6}^y = \begin{bmatrix} b_y G_y & 0 & 0 & 0 & -a_y C_y & 0 \\ 0 & b_x G_x & 0 & a_x C_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i_N \xi_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_x C_x & 0 & i_x A_x & 0 & 0 \\ -a_y C_y & 0 & 0 & 0 & i_y A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_k \xi_k \end{bmatrix},$$

$$[h_g(\omega)]_{6 \times 6}^k = \begin{bmatrix} -b_y H_y & 0 & 0 & 0 & -a_y D_y & 0 \\ 0 & -b_x H_x & 0 & a_x D_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -i_N \xi_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_x D_x & 0 & i_x B_x & 0 & 0 \\ a_y D_y & 0 & 0 & 0 & i_y B_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -i_k v_k \end{bmatrix},$$

$$[h_g(\omega)]_{6 \times 6}^{ik} = \begin{bmatrix} b_y G_y & 0 & 0 & 0 & a_y C_y & 0 \\ 0 & b_x G_x & 0 & -a_x C_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & i_N \xi_N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_x C_x & 0 & i_x A_x & 0 & 0 \\ a_y C_y & 0 & 0 & 0 & i_y A_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & i_k \xi_k \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В соотношениях (1),(2) приняты следующие обозначения:

$$\xi_N = i_N v \operatorname{ctg} v; v_N = i_N \frac{v}{\sin v}; \xi_k = i_k \chi \operatorname{ctg} \chi; v_k = i_k \frac{\chi}{\sin \chi};$$

$$i_x = \frac{EJ_x}{l}; a_x = \frac{i_x}{l}; b_x = \frac{a_x}{l}; i_N = \frac{EA}{l}; i_k = \frac{GJ_k}{l};$$

$$v = \sqrt{\frac{gl^2 \omega^2}{gEA}}; \chi = \sqrt{\frac{J_N l^2 \omega^2}{GJ_k}}; S = x, y;$$

q - статистическая нагрузка, приходящаяся на единицу длины КЭ, включая собственный вес; J_m - массовый момент инерции, учитывающий инерцию поворота поперечного сечения. Выражения для функций A, B, \dots , трансцендентно зависящих от частоты колебаний ω через параметр λ

$$\lambda = l \cdot \sqrt[4]{\frac{q \omega^2}{g \eta E I}}$$

приведены в работе. Любые другие граничные условия учитывают с помощью жордановых исключений. Уравнение движения всей м/к получено МКЭ

$$H(\mu, W(t))W(t) + \Phi \dot{W}(t) + M \ddot{W}(t) = F(V, W(t), \dot{W}(t)) + Q(t). \quad (3)$$

Здесь H - матрица жесткости, составленная с учетом геометрической и физической нелинейности конструкции; $W(t)$ - вектор обобщенных координат; M и Φ - инерционная и диссипативная матрицы; F и Q - векторы стационарных неконсервативных и нестационарных обобщенных усилий; μ, V - скалярные параметры м/к. Размерности матриц H, M, \dots отвечают числу N степеней свободы конструкций.

Из уравнения (3) получены уравнения, позволяющие рассчитывать НДС м/к при статических нагрузках и определять параметры свободных и вынужденных колебаний геометрически нелинейных конструкций. При расчёте на сейсмические воздействия вектор $Q(t)$ содержит составляющую $-Ma_0(t)$, где $a_0(t)$ - вектор акселерограммы землетрясения.

В третьей главе выполнена модернизация методов ГЛ и ЭЛ применительно к задачам динамической прочности и устойчивости движения м/к кранов.

Решение уравнения (3) разыскивают в виде

$(t) = W_0 + \Delta W(t)$, где $W_0, \Delta W(t)$ - векторы ОК равновесного состояния и основного движения.

В соответствии с методом ГЛ решение разыскивают в виде

$$\Delta W(t) = \sum_{j=1}^n (W_j \cos \theta_j t + W'_j \sin \theta_j t), \quad (4)$$

где частоты

$$\theta_j = \frac{2\pi}{T} \gamma_j, \quad \theta_j = \frac{2\pi}{T_0} \frac{\gamma_j}{l};$$

γ_j — последовательность целых чисел такая, что:

- среди γ_j/l содержатся все номера ненулевых гармоник разложения

$$Q(t) = Q_0 + \sum_{j=1}^n (Q_j \cos \theta_j t + Q'_j \sin \theta_j t); \quad (5)$$

- в набор θ_j включены некоторые характерные для данной конструкции частоты (отвечающие, например, суб- или супергармониками). Нелинейные члены уравнения (3) геометрически линеаризуем, погрешности линеаризации Γ_H и Γ_F аппроксимируем рядами

$$\Gamma_S(\mu, v, W_0, \Delta W, \Delta \dot{W}) = \Gamma_{S0} + \sum_{j=1}^n (\Gamma_{Sj} \exp(i\theta_j t) + \text{k.c.}), \quad S = H, F. \quad (6)$$

и получаем систему линеаризованных алгебраических уравнений относительно неизвестных компонент вектора ОК

$$H(\mu, W_0)W_0 = Q_0 + \Gamma_{F0}[v, W_0, W_1, \dots, W_n'] - \\ - \Gamma_{Hn}[\mu, W_0, \Delta \dot{W}_1, \dots, W_n'];$$

$$\begin{bmatrix} H - \theta_j^2 M & \theta_j \Psi \\ -\theta_j \Psi & H - \theta_j^2 M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_j \\ W_j' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_j + \Gamma_{Fj} - \Gamma_{Hj} \\ Q_j' + \Gamma_{Fj}' - \Gamma_{Hj}' \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Причём, правая часть уравнений (7) в силу равенств (4), (6) зависит от неизвестного решения $W(t)$. Поэтому алгебраические уравнения (7) решаем методом последовательных приближений, принимая за начальное приближение решение линейной части уравнения (3). Если θ_j близка к одной из собственных частот, то матрица системы уравнений (7) становится плохо обусловленной.

Второй вариант уравнений относительно амплитудно-фазовых характеристик вынужденных колебаний получим применив ЭЛ нелинейных членов. Согласно методу ЭЛ, положим

$$\begin{aligned}\Gamma_H(\mu, W_0, \Delta W(t)) &\approx \Lambda_H[\mu, W_0, \Delta W] \Delta W(t) + \Gamma_{H_0}, \\ \Gamma_F(v, W_0, \Delta W(t), \Delta \dot{W}(t)) &= \Lambda[v, W_0, \Delta W, \Delta \dot{W}] \Delta W(t) + \\ &+ \Lambda'_F[v, W_0, \Delta W, \Delta \dot{W}] \Delta \dot{W}(t) + \Gamma_{F_0}. \quad (8)\end{aligned}$$

Компоненты матриц линеаризации получаем по соотношениям

$$\begin{aligned}\Lambda_H^* &= K_H^{-1} \int_0^T \Delta W(t) \Gamma_H^*(\mu, W_0, \Delta W(t)) dt; \\ \begin{bmatrix} \Lambda_F^* \\ \Lambda'_F \end{bmatrix} &= K_F^{-1} \int_0^T \begin{bmatrix} \Delta W(t) \\ \Delta \dot{W}(t) \end{bmatrix} \times \Gamma_F^*(v, W_0, \Delta W(t), \Delta \dot{W}(t)) dt. \quad (9)\end{aligned}$$

Здесь и в дальнейшем знак * означает транспонирование матриц; коэффициенты матриц K_H и K_F вычисляем по формулам

$$K_H = \int_0^T \Delta W(t) \Delta W^*(t) dt; K_F = \int_0^T \begin{bmatrix} \Delta W(t) \\ \Delta \dot{W}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta W^*(t) \\ \Delta \dot{W}^*(t) \end{bmatrix} dt.$$

В результате получим линеаризованное дифференциальное уравнение

$$(H + \Lambda_H - \Lambda_F) \Delta W(t) + (\Psi - \Lambda'_F) \Delta \dot{W}(t) + M \Delta \ddot{W}(t) = Q(t) - Q_0. \quad (10)$$

В силу равенств (9) матрицы левой части уравнения (10) зависят от искомого решения $W(t)$. Поэтому (10) решаем методом последовательных приближений, принимая за начальное приближение решение линейной части уравнения (3).

Если в м/к описываемой уравнением (3) возможны автоколебания и/или комбинационные резонансы, то решение разыскиваем в виде

$$\Delta W(t) = \sum_{j=0}^n (W_j \exp(i\theta_j t) + \text{к.с.}) + \sum_{k=1}^m \alpha_k (V_k \exp(i\omega_k t) + \text{к.с.}) \quad (11)$$

В равенстве (11) θ_j известные частоты, V_k векторы, характеризующие форму вынужденных и резонансных, на частотах ω_K , колебаний; α_K - коэффициенты амплитуд.

Систему разрешающих уравнений относительно неизвестных составляющих решения (4) получают, подставив соотношение (11) в линеаризованное уравнение (10). В итоге имеем:

$$(H + \Lambda_H - \Lambda_F + i\theta_j(\Psi - \Lambda'_F) - \theta_j^2 M)W_j = Q_j; \quad (12)$$

$$(H + \Lambda_H - \Lambda_F + i\omega_K(\Psi - \Lambda'_F) - \omega_K^2 M)V_K = 0, \quad (13)$$

$$D_K = \det(H + \Lambda_H - \Lambda_F + i\omega_K(\Psi - \Lambda'_F) - \omega_K^2 M) = 0. \quad (14)$$

Линеаризованное уравнение (12) служит для отыскания амплитудно-фазовых характеристик W_j ; линеаризованное одно-

родное уравнение (13) - форм V_K , нелинейные уравнения (14) - амплитуд α_K и частот ω_K резонансных составляющих решения. Систему уравнений (12)-(14) решают итерационным методом.

Исследование устойчивости полученного решения сведено к задаче о параметрическом резонансе и анализу корней определителей бесконечномерных систем линейных алгебраических уравнений, что позволяет выделить области частот, при которых движение устойчиво.

Разработаны алгоритмы расчёта характеристик авто- и вынужденных колебаний нелинейных м/к крановых сооружений при детерминированных воздействиях. Работоспособность и сходимость предложенных итерационных алгоритмов проиллюстрирована решением разнообразных тестовых примеров с известными аналитическими решениями: с нелинейной координатной связью; с трением нелинейно зависящим от перемещений и скоростей; одно и двухчастотные колебания. Предложен способ ускорения сходимости итерационного алгоритма.

В четвёртой главе разработаны алгоритмы расчёта вероятностных характеристик пространственных м/к кранов при случайных, в том числе сейсмических воздействиях. Рассмотрены стационарные и нестационарные внешние воздействия, полагая,

что в уравнении (3) $F \equiv F(v, W(t), \dot{W}(t), Q(t))$. Использовались интегральные представления внешних воздействий, а также разложения с помощью интерполяционных полиномов и случайных векторов.

При совместном действии детерминированной полигармонической и случайной стационарной нагрузок соотношение (5) принимает вид:

$$Q(t) = \tilde{Q} + Q_d(t) + Q^{ca}(t) = \tilde{Q} + \sum_{j=1}^n (Q_j \exp(i\theta_j t) + \text{к.с.}) + Q^{ca}(t) \quad (15)$$

Решение уравнения (3) разыскиваем в виде

$$W(t) = \tilde{W} + W_d(t) + W^{ca}(t) = \tilde{W} + \sum_{j=1}^n (W_j \exp(i\theta_j t) + \text{к.с.}) + \sum_{l=1}^m \alpha_l (V_l \exp(i\omega_l t) + \text{к.с.}) + W^{ca}(t) \quad (16)$$

В равенствах (15)-(16) значки “ \sim ” и “сл” означают математическое ожидание и центрированный случайный стационарный процесс. Применяя геометрическую, статистическую и ГЛ к нелинейным членам дифференциального уравнения (3), пренебрегая членами содержащими произведения случайных и детерминированных составляющих и гармонически линеаризуя остальные, получаем:

$$H(\mu, W)W \approx H(\mu, \tilde{W})\tilde{W} + \bar{G} \Big|_{W_d=0} + \left(\frac{\partial HW}{\partial W} \Big|_{W=\tilde{W}} + \frac{\partial \bar{G}}{\partial W_d} \Big|_{W_d=0} \right) W_d(t) + \sum_{j=1}^n L_{jHB} (W_j + \text{к.с.}) + \sum_{l=1}^m L_{jHA} \alpha_l (V_l + \text{к.с.}) + \Lambda_{HC} W(t)^{ca};$$

$$F(v, W, \dot{W}, Q) \approx F(v, \tilde{W}, 0, \tilde{Q}) + \bar{F} \Big|_{W_d=0} + \left(\frac{\partial F}{\partial W} + \frac{\partial F}{\partial W_d} \right) \Big|_{W=\tilde{W}} W_d(t) + \left(\frac{\partial F}{\partial \dot{W}} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial \dot{W}_d} \right) \Big|_{W_d=0} \dot{W}_d(t) + \left(\frac{\partial F}{\partial Q} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial Q_d} \right) \Big|_{Q=\tilde{Q}} Q_d(t) + \sum_{j=1}^n L_{jP} (W_j + \text{к.с.}) + \sum_{l=1}^m L_{jPA} \alpha_l (V_l + \text{к.с.}) + \sum_{r=1}^n L_{rQ} (Q_r \exp(i\theta_r t) + \text{к.с.}) + \Lambda_{PC} W^{ca}(t) + \Lambda_{PC}^* \dot{W}^{ca}(t) + \Lambda_{QC} Q^{ca}(t) \quad (17)$$

В равенствах (17) принято

$$\tilde{G} = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_H(\mu, W_d, W) \rho(W) dW;$$

$$\tilde{F} = \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_F(v, W_d, W, \dot{W}_d, \dot{W}, Q_d, Q) \rho(W, Q) \rho(\dot{W}) dW dQ d\dot{W};$$

$$\Lambda_H^* = K_{WW}^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} (W - \tilde{W}) \Gamma_H^*(\mu, W_d, W) \rho(W) dW,$$

$$\begin{bmatrix} \Lambda_F^* \\ \Lambda_Q^* \\ \Lambda_{\dot{W}}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{WW} & K_{WQ} & 0 \\ K_{QW} & K_{QQ} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\dot{W}\dot{W}} \end{bmatrix}^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} W - \tilde{W} \\ Q - \tilde{Q} \\ \dot{W} \end{bmatrix} \times$$

$$\times \Gamma_F^*(v, W_d, W, \dot{W}_d, \dot{W}, Q_d, Q) \rho(W, Q) \rho(\dot{W}) dW dQ d\dot{W}.$$

Здесь интегрирование производится по переменным

$$W := \tilde{W} + W^{cr}, Q := \tilde{Q} + Q^{cr}, \dot{W} := \dot{W}^{cr}.$$

Заметим, что векторы \tilde{G} , \tilde{F} , матрицы геометрической и статистической линеаризации зависят от $W_d(t), \dot{W}_d(t)$.

Подставив соотношения (15)-(17) в исходное нелинейное уравнение (3), разделив уравнения относительно регулярных и случайных составляющих, имеем:

$$H(\mu, \tilde{W}) \tilde{W} + \tilde{G}_0 = F(v, \tilde{W}, 0, \tilde{Q}) + \tilde{F}_0 + \tilde{Q}; \quad (18)$$

$$(H_d + L_{jHB} - L_{jF} + i\theta_j \Psi_d - M\theta_j^2) W_j = L_j Q_j; \quad (19)$$

$$(H_d + \alpha_{HI} L_{IHA} - \alpha_{FI} L_{IFA} + i\omega_l \Psi_d - M\omega_l^2) \dot{Y}_l = 0; \quad (20)$$

$$\det[H_d + \alpha_{HI} L_{IHA} - \alpha_{FI} L_{IFA} + i\omega_l \Psi_d - M\omega_l^2] = 0; \quad (21)$$

$$(H_c + \Lambda_{HC} - \Lambda_{FC}) \ddot{W}^{ca}(t) + (\Psi_c - \Lambda'_{FC}) \dot{W}^{ca}(t) + M \ddot{W}^{ca}(t) = \\ = (F_{QC} + \Lambda_{QC}) Q^{ca}(t). \quad (22)$$

В уравнениях (18)-(22) принято:

$$H_d = \frac{\partial}{\partial w} (HW - F) \Big|_{\substack{w=\bar{w} \\ Q=0}} + \frac{\partial}{\partial w_d} (\tilde{G} - \tilde{F}) \Big|_{\substack{w_d=0 \\ w=\bar{w} \\ Q=0}}; \\ \Psi_d = \Phi - \frac{\partial F}{\partial \dot{W}} \Big|_{\substack{w=\bar{w} \\ Q=0}} - \frac{\partial \tilde{F}}{\partial \dot{W}_d} \Big|_{\substack{w_d=0 \\ w=\bar{w} \\ Q=0}}; \\ H_c = \frac{\partial}{\partial w} (HW - F) \Big|_{\substack{w_d=0 \\ w=\bar{w} \\ Q=0}}; \quad \Psi_c = \Phi - F_{\dot{w}c};$$

$$F_{wc} = \frac{\partial F}{\partial \dot{w}} \Big|_{\substack{w_d=0 \\ w=\bar{w} \\ Q=0}}; \quad F_{qc} = \frac{\partial F}{\partial \dot{w}} \Big|_{\substack{w_d=0 \\ w=\bar{w} \\ Q=0}}. \quad (23)$$

Нелинейное алгебраическое уравнение (18) относительно вектора математических ожиданий \tilde{W} , линейризованные уравнения (19)-(21) относительно периодических и (22) случайных составляющих колебаний связаны и могут быть решены методом последовательных приближений с итерационным уточнением матриц линеаризации.

В пятой главе выполнен учёт влияния вибрационных составляющих продольных сил на характеристики колебаний геометрически нелинейных пространственных м/к кранов. Получены линейризованные матрицы жёсткости КЭ в мск, описывающие нелинейные перекрёстные связи различных обобщённых координат.

Для верификации программного обеспечения использовались не только аналитические решения, но и была собрана экспериментальная установка и выполнено сравнение экспериментальных измерений и результатов теоретических расчетов по комплексам программ (КП). Экспериментальная установка представляет собой пространственную м/к, состоящую из четырех ортогональных прямолинейных стальных стержней кольцеобразного сечения.

Модель расположена на жесткой неподвижной раме и присоединена к ней в четырех узлах. Причем эти узлы моделируют наиболее типичные соединения в крановых м/к: жесткое заземление; шарнирно – неподвижная опора (шаровой шарнир); шарнирно – подвижные опоры; узел без ограничения степени подвижности.

В ходе эксперимента регистрировались перемещения и, с помощью метода электрического тензометрирования, нормальные напряжения. Для этого на наружной поверхности стержней было наклеено 17 тензодатчиков. С целью повышения точности измерений рабочие датчики были тарированы по напряжениям. Тарировочный образец был изготовлен из того же материала, что и стержни модели. В его среднем сечении были наклеены два тензодатчика. Причем, как и обычно при центральном растяжении, на диаметрально противоположных точках сечения (для исключения влияния изгибных деформаций).

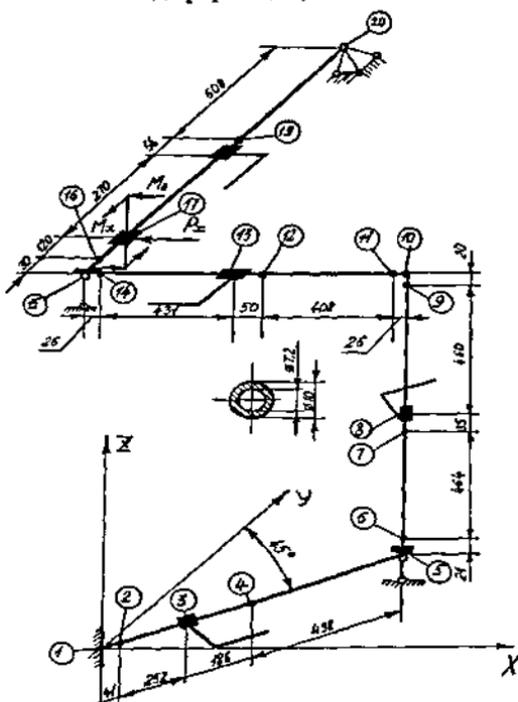


Рис. 1. Расчётная схема экспериментальной установки.

Перемещения фиксировались в узлах 5 и 15 (рис.1) по направлениям осей Y_1 и X_4 МСК соответственно. Для этого в этих узлах были установлены упругие элементы с наклеенными на них двумя тензодатчиками. Их показания были протарированы по перемещениям с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Регистрирующим прибором служил измеритель статических деформаций ИСД-3 с переключателем на 20 тензодатчиков.

На рис. 2,3 приведены результаты статических испытаний.

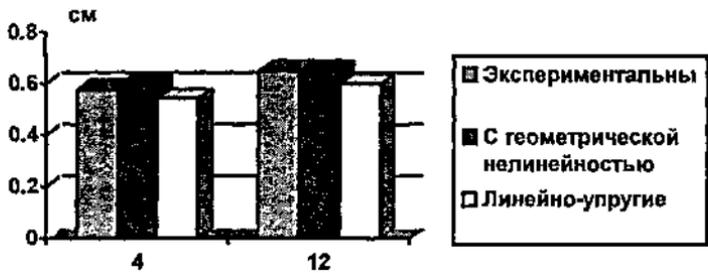


Рис. 2. Сравнение статических перемещений.

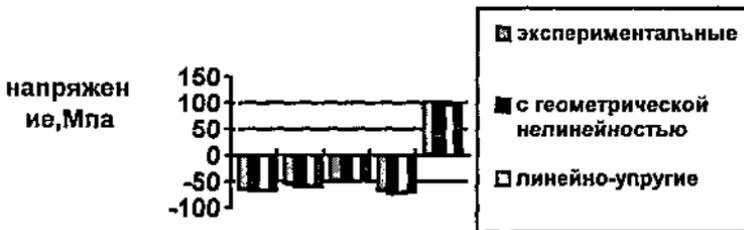


Рис.3. Сравнение статических напряжений.

Среднее расхождение между опытными и расчетными (с учетом геометрической нелинейности) величинами для напряжений составля-ет 1,7 %, причем, по наибольшему $\sigma_{MAX} = 101 \text{ МПа} - 0,7\%$; соответствующие цифры для опытных и расчетных линейно-упругих величин составили 13,3 % и 6,9 %.

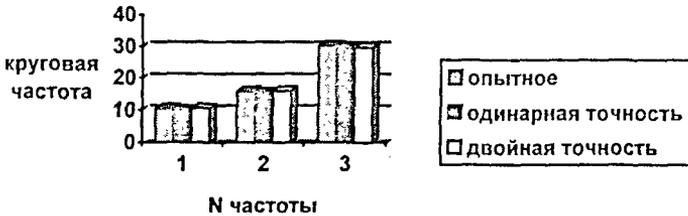


Рис. 4. Сравнение частот свободных колебаний.

Частоты свободных колебаний определялись резонансным методом. Колебания возбуждались специально изготовленным вибратором, собранным из микродвигателя, понижающего редуктора с дисбалансом на выходном вале и платформы, прикреплённой к модели. Масса вибратора без дисбаланса $M_v = 450 \text{ г}$, масса дисбаланса $M_d = 40 \text{ г}$, расстояние от оси вращения до центра тяжести груза $h = 5 \text{ см}$. Вибратор был установлен в узле 17 (рис.1).

Изменение угловой скорости вращения дисбаланса выполнялось реостатом. В связи с малым затуханием м/к модели, напряжения в околорезонансной зоне значительно возрастали, что сделало возможным достаточно точно визуально фиксировать момент наступления резонанса.

Электрические сигналы от регистрирующего прибора ИСД-3 подавались на осциллограф Н-115 в котором фиксировались на фотобумаге.

При испытании на вынужденные колебания экспериментальные напряжения и перемещения фиксировались при воздействиях $F_x(t) = 1,21 \sin 9,1t$ и $M_z(t) = 0,007 \sin 9,1t$, приложенных в узле 17. Сравнение результатов эксперимента и расчёта по КП в характерных узлах модели приведено на рис. 5.

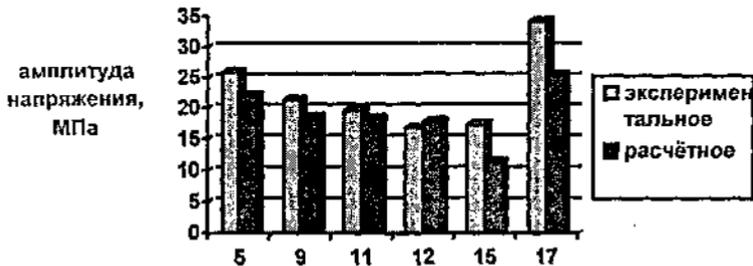


Рис. 5. Сравнение амплитудных значений напряжений.

Результаты расчёта вынужденных гармонических колебаний м/к модели хорошо согласовались с экспериментальными данными, среднее расхождение по напряжениям составило 13 %, по перемещениям 8 %.

Следовательно, поставленные эксперименты подтвердили работоспособность КП при расчётах геометрически нелинейных м/к на статические нагрузки, свободные и вынужденные гармонические колебания, а также достоверность получаемых на основе КП результатов.

С применением КП выполнены расчёты реальных м/к кранов. Мостовой электрический кран для узла свежего топлива АЭС "Хурагуа", Куба, имеет г/п основного крюка 16 т, вспомогательного 3,2 т и пролёт 11 м. Мост крана состоит из двух про странственных коробчатых балок, опирающихся на концевые балки. М/к моста сварная, образует горизонтальную раму. Пролётная балка состоит из двух вертикальных стенок и двух горизонтальных поясов коробчатого сечения с двумя осями симметрии. Для этого крана было разработано две РДМ: 1-я с 24 узлами, 27 КЭ и 144 степенями свободы (рис. 6); 2-я с 33 узлами, 38 КЭ и 228 степенями свободы (рис. 7).

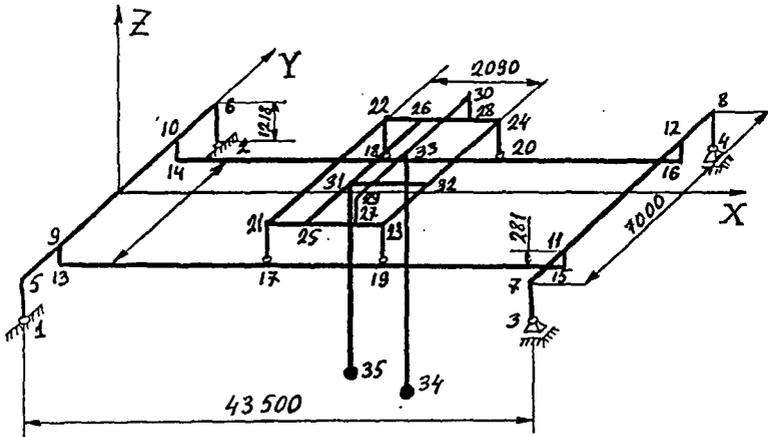


Рис. 8. РДМ мостового крана Раздан ГРЭС г/п 125/20 т.

Полукозловой кран для Раздан ГРЭС имеет г/п 30 т, пролёт 27,82 м. Кран изготовлен ЗЭМЗ и установлен в 3-4 блоках. Мост крана двух балочный. РДМ крана (рис.9) имеет 36 узлов, 74 КЭ и 216 степеней свободы.

Для м/к крана АЭС "Хурагуа" при использовании динамической матрицы жёсткости и упрощённой РДМ (см. рис.6) с 24-ю узлами (144 степени свободы) были получены первые 11 частот спектра частот свободных колебаний (Гц): 1,618; 2,546; 4,138; 4,821; 11,250; 13,070; 14,642; 18,688; 20,193; 24,868; 26,564. Более детальная РДМ (см. рис.7) с 33-мя узлами (198 степеней свободы) предназначена для максимально приближённого к действительности отражения пространственного характера колебаний м/к крана совместно с тележкой. Частоты свободных колебаний определены при двух различных способах учёта массы КЭ: с помощью динамической матрицы жёсткости и матрицы распределённых масс. Результаты расчётов для наглядного сравнительного анализа представим в виде диаграмм (рис. 10 - рис. 12).

Из диаграмм на рис. 10 видно, что РДМ с 33 узлами обладает более плотным спектром частот, по сравнению с РДМ с 24 узлами. Так, в спектре частот упрощённой модели отсутствуют

частоты с номерами 5-7, 13, и 15. Совпадающие частоты имеют достаточно близкие значения.

Аналогичная картина наблюдается и на диаграммах отражающих влияние способов учёта распределённой массы на спектр частот РДМ. При среднем положении тележки (рис.12), в спектре частот РДМ с 24 узлами отсутствуют частоты с номерами 6 и 8.

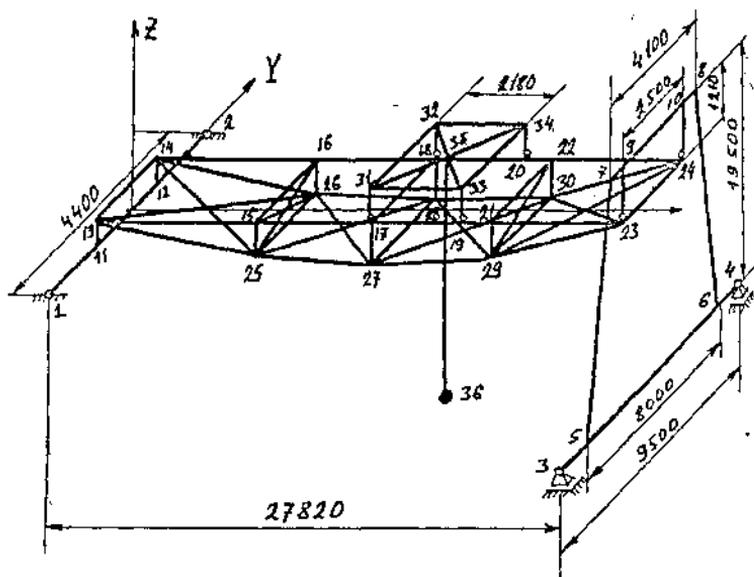


Рис. 9. РДМ полукозлового крана Раздан ГРЭС.

На диаграмме рис. 11 отражено влияние положения грузовой тележки на спектр частот РДМ. Легко видеть, что спектр частот можно сдвигать изменяя положение тележки. Это особенно заметно для частот с номерами 1, 3, 4, 5, 9-15.

Сдвиг спектра частот РДМ позволяет увести конструкцию из резонансной зоны, уменьшить сейсмические нагрузки при расчётах по ЛСМ.

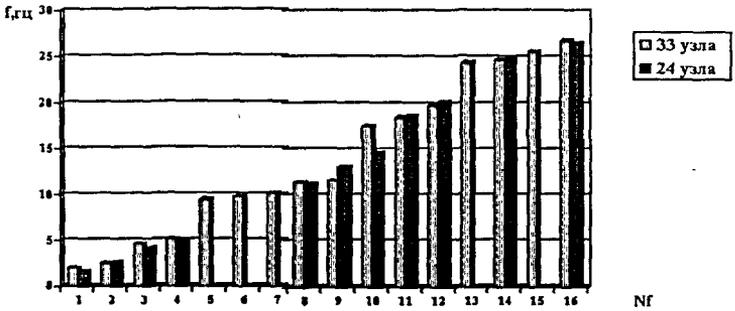


Рис. 10. Частота крана АЭС "Хурагуа" при различном числе степеней свободы

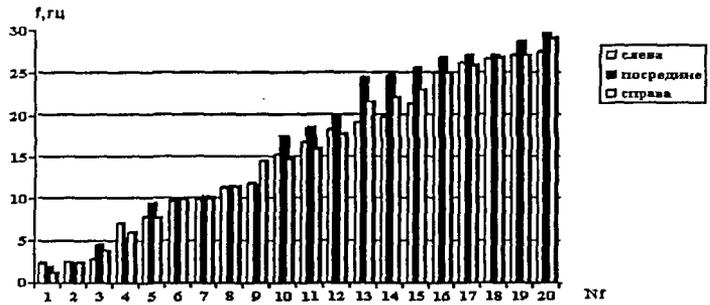


Рис. 11. Частоты крана АЭС "Хурагуа" при различных проложениях тележки.

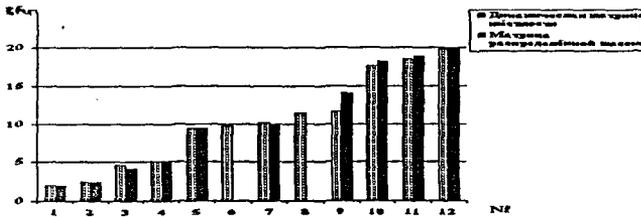


Рис. 12. Частоты при различных способах учета распределенной массы.

Формы свободных колебаний вычислялись итерационным методом на основе метода обратной итерации. Формы свободных колебаний наглядно отображаются при компьютерной анимации, при этом виден пространственный характер колебаний м/к кранов.

С использованием программных средств МСАД составлены программы анимации форм колебаний.

Для кранов Разданской ГРЭС (см. рис. 8, рис.9) первые 5 частот из полного спектра оказались, соответственно, 0,269; 0,273; 1,185; 3,131; 5,097 и 0,179; 0,694; 1,497; 1,562; 1,973. Остальные частоты и ОК форм свободных колебаний не приведены из-за большого объема информации.

При оценке сейсмостойкости этих м/к по ЛСМ в соответствии с РД 24.035.04-89 определена их сейсмостойкость, за исключением полукозлового крана.

Для оценки влияния сухого трения в опорных узлах м/к на амплитудно-фазовые характеристики колебаний рассмотрена РДМ крана (см. рис. 6) в узлах 19 и 24 которой учтено сухое трение заторможенных колёс по рельсовому пути. Расчёт АФЧХ выполнен по методу ГЛ в соответствии с главой.3. Наличие сухого трения привело к изменению амплитуд внутренних усилий от внешней гармонической нагрузки, приложенной в узлах 19 и 24 и существенному увеличению сдвига фаз. График перемещения 19-го узла вдоль оси ОУ приведен на рис. 13.

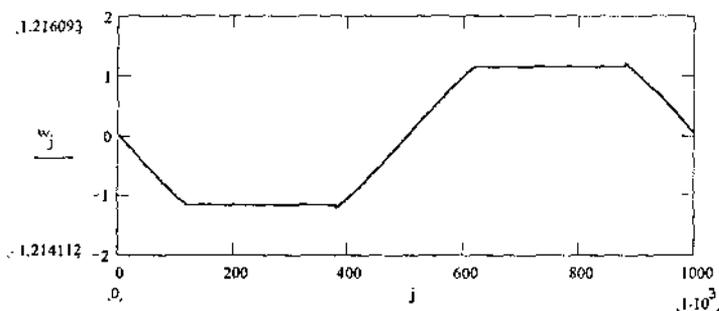


Рис.13. Перемещение 19-го узла вдоль оси ОУ за период колебания.

На рис. 13 наблюдаются две зоны застоя, узел "прилипает" к рельсу когда равнодействующая сил упругости, инерции и внешнего воздействия меньше силы трения.

В приложении приведены компьютерные рисунки форм колебаний для крана узла свежего топлива с 24-мя и 33-мя узлами и сведения о внедрении работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Упрощение РДМ за счёт уменьшения ОК может привести к искажению АФЧХ конструкции, пропуску ряда частот свободных колебаний и недостаточно подробному описанию пространственной работы конструкции.
2. Учёт распределённой массы КЭ РДМ приводит к появлению в спектре частот свободных колебаний дополнительных частот более полно отражающих пространственный характер колебаний м/к.
3. Варьирование положения грузовой тележки позволяет в некоторых пределах управлять спектром частот свободных колебаний, уводить конструкцию из резонансных зон, снижать сейсмические нагрузки на м/к.
4. Учёт конструкционной нелинейности позволяет более полно моделировать действительную пространственную работу конструкции как системы с распределённой массой и большим числом степеней свободы.
5. Усовершенствованы математические конечно-элементные модели пространственных м/к кранов за счёт учёта распределённой массы, геометрической и конструкционной нелинейности. Эти модели развивают и дополняют РДМ, применяемые в нормативных материалах. Это позволило максимально правдоподобно отражать действительную пространственную работу м/к кранов, добиться лучшего согласования с имеющимися экспериментальными результатами.
6. Развита и апробирована методы ГЛ и ЭЛ применительно к задачам вынужденных колебаний и сейсмостойкости м/к кранов как нелинейных конструкций большой размерности. Предложенные на основе ГЛ и Эл алгоритмы позволили решать нелинейные дифференциальные уравнения движения м/к кранов большой размерности, что отсутствует в нормативных материалах.
7. Для некоторых типичных нелинейностей кранов таких как нелинейное трение, нелинейные перекрёстные связи ОК показана работоспособность и сходимости предложенных алгоритмов при одно и многочастотных колебаниях.
8. При компьютерном моделировании выявлено преимущество предложенных дискретно-континуальных РДМ большой размерности

Разработанное программное обеспечение позволяет решать частичную проблему собственных значений и строить формы колебаний методом обратной итерации, а также анимировать формы колебаний на компьютере.

9. Существенным преимуществом предложенных алгоритмов является учёт ленточной структуры матриц жёсткости, масс и диссипации. Причём, на матрицу диссипации не накладывается жёстких требований по обеспечению перехода к главным координатам, т.к. алгоритмы позволяют выполнять вычисления в обобщённых координатах. Это позволяет рассчитывать конструкции с различными уровнями диссипации.

Материалы диссертации отражены в следующих печатных работах:

1. Воронцов Г.В., Наугольников В.А. Применение методов линеаризации в задачах динамики сооружений //Изв. Сев. Кавказ. науч. центра высш. шк. Сер.Техн.науки.-1985.-№ 3.-с.53-57.
2. Воронцов Г.В., Пятницын Д.А., Наугольников В.А. Применение метода гармонической линеаризации к расчёту устойчивости и вынужденных колебаний нелинейных многоканальных систем регулирования//Изв. ВУЗ Электромеханика.-1986.-№ 6.-с.54-59.
3. Воронцов Г.В., Наугольников В.А., Кабельков А.Н. Итерационные методы линеаризации в многомерных задачах динамики нелинейно деформируемых конструкций//Прочность, устойчивость и колебания конструкций//Сб.науч.тр. НПИ.-Новочеркасск: Новочеркасск. политехн. ин-т.-1993.-с. 40-51.
4. Воронцов Г.В., Кабельков А.Н., Наугольников В.А. Исследование колебаний нелинейно деформируемых конструкций методом обобщённой гармонической линеаризации /Новочерк. политехн. ин-т.- Новочеркасск: 1986.-12с.-Деп.ВНИИС, № 6282.
5. Воронцов Г.В., Наугольников В.А. Расчёт амплитудно-фазовых характеристик нелинейных систем на основе гармонической линеаризации /Новочерк. политехн. ин-т.-Новочеркасск:1986.-10с.-Деп. ВИНТИ,23.04.86, № 2987.
6. Воронцов Г.В., Наугольников В.А. Исследование точности нелинейных стохастических САР итерационными методами статистической линеаризации и интерполяции случайных процессов/ Новочерк. политехн. ин-т.-Новочеркасск:1986.-9с.-Деп.ВИНИТИ, 21.07.86, № 5336.

7. Воронцов Г.В., Наугольников В.А. Расчёт нелинейных стохастических САР итерационными методами статистической линеаризации//Изв.ВУЗ Электромеханика.- 1987.- № 7.-с.62-67.
8. Воронцов Г.В., Наугольников В.А. Применение методов линеаризации к задачам исследования многочастотных автоколебательных режимов нелинейных САР//Изв.ВУЗ Электромеханика.- 1988.-№ 4.-с.44-50.
9. Дудченко А.Н., Наугольников В.А., Панасенко Н.Н., Юзиков В.П. Расчёт пространственных трубопроводов АЭС с учётом геометрической нелинейности/Ред.ж.Изв.Сев. Кавказ. науч.центра высш.шк. -Ростов-на- Дону: Сер.Техн.науки.-1985.-10с.-Деп.ВИНИТИ,№ 2578-В 86.
10. Дудченко А.Н.,Наугольников В.А.,Панасенко Н.Н.,Юзиков В.П. Расчёт собственных колебаний пространственных трубопроводов АЭС с учётом геометрической нелинейности и сдвиговых деформаций /Ред.ж. Изв.Сев. Кавказ. науч. центра высш.шк. -Ростов-на-Дону: Сер. Техн.науки.-1986.-9с.-Деп.ВИНИТИ, 20.08.86,№ 5931-В 86.
11. Наугольников В.А. Влияние геометрической нелинейности на амплитудно-частотные характеристики полигармонических колебаний стержневых конструкций//Тезисы докл.отрасл. (Минатомэнергопром) научно-техн. конф. "Методы анализа брака при производстве изделий машиностроения".-Новочеркасск:НПИ, 1990.-с.77-78.
12. Наугольников В.А. Расчёт вероятностных характеристик колебаний крановых конструкций АС с учётом сухого трения при нестационарных случайных воздействиях//Тезисы докл.отрасл. (Минатомэнергопром) научно-техн. конф. "Методы анализа брака при производстве изделий машиностроения".-Новочеркасск: НПИ, 1990.-с.78-79.
13. Наугольников В.А. Эквивалентная линеаризация нелинейных уравнений движения подъёмных сооружений//Проблемы технической безопасности подъёмных сооружений. Тезисы докл. российской научно-практической конф.19-22 сентября 1995г.-Новочеркасск:НГТУ,1995,с.17-18.
14. Наугольников В.А. Нелинейные динамические модели подъёмных сооружений//Современные проблемы машиностроения и технический прогресс.Тезисы докл. международной научно-техн. конф.10-13 сентября 1996г.-Донецк:ДонГТУ,1996.-с.294.

15. Панасенко Н.Н., Наугольнов В.А., Прудаков В.Т. Влияние статических нагрузок и распределённой массы на характеристики вибрационных режимов крановых металлоконструкций.

//Прогрессивные технологии машиностроения и современность. Тезисы докл. международной научно-техн. конф.9-12 сентября 1997г.-Донецк: ДонГТУ, 1997.-с.189.

16. Панасенко Н.Н., Наугольнов В.А. Расчёт геометрически нелинейных пространственных металлоконструкций грузоподъёмных кранов с распределёнными параметрами на вибрационные воздействия/Ред.ж. Изв.Сев. Кавказ. науч.центра высш.шк. -Ростов-на- Дону: Сер.Техн. науки. -1990.-Деп. ЦНИИТЭИТяжмаш,26.03.90,№ 574-ТМ90.