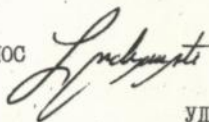


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
КИЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

На правах рукописи

ИНЧАУСТИ АВИЛЕС ХУАН КАРЛОС



УДК 539.3

ДИНАМИЧЕСКОЕ ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИИ ВЫСОТНЫХ СООРУЖЕНИИ
ПРИ СТАЦИОНАРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

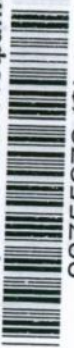
Специальность 05.23.17. - Строительная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1994

46-3152

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00755976 (\$)

Диссертация является рукописью.

Работа выполнена на кафедре строительной механики и в Научно-исследовательском институте строительной механики Министерства образования Украины при Киевском государственном техническом университете строительства и архитектуры.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Баженов В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
глав. науч. сотрудник Перельмутер А.В.

кандидат технических наук,
ст. науч. сотрудник Филалко С.Ю.

Ведущая организация: Киевский политехнический институт

Защита диссертации состоится " 13 " января 1995 г.
в 13⁰⁰ часов на заседании специализированного совета К 068.05.04
в Киевском государственном техническом университете строительства
и архитектуры (252037, г. Киев, Воздухофлотский проспект, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского государственного технического университета строительства и архитектуры.

Автореферат разослан " 13 " декабря 1994 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат технических наук

Н.Г. Кушниренко

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Актуальность темы. Задача уменьшения уровня колебаний конструкций, возбуждаемых случайными воздействиями, является актуальной в различных областях техники: промышленном и гражданском строительстве, транспортном и энергетическом машиностроении, приборостроении, вертолето-, самолетостроении и т.п. Проблема связана с необходимостью повышения прочности и снижения материалоемкости конструкций, выполнением технологических требований, предъявляемых к условиям эксплуатации, а также защитой людей от вредного действия вибраций.

Одним из самых эффективных средств пассивной борьбы с недопустимыми уровнями колебаний конструкций являются динамические гасители колебаний (ДГК). Достоинством ДГК является то, что их использование может быть предусмотрено не только на стадии проектирования объекта, но и в случае, когда неудовлетворительные динамические качества конструкции выявлены уже в процессе ее эксплуатации. При сравнительно малых затратах они позволяют относительно просто получить желаемый эффект уменьшения уровня колебаний. Область практического использования гасителей весьма широка. Они применяются в таких конструкциях, как стальные вентиляционные, выхлопные и дымовые трубы, телевизионные башни, солнечные телескопы, здания, надземные трубопроводы, мосты, провoда и канаты, фундаменты под машины, самолеты, вертолеты, автомобили, вагоны, суда, роботы, измерительные приборы, космические конструкции и т.д.

Строительство высотных сооружений получило широкое развитие в XX в. К высотным сооружениям относятся промышленные дымовые и вентиляционные трубы, опоры радиорелейных линий, радио и телевизионные башни, буровые вышки, различные установки колонного типа, применяемые в химической промышленности, башни телескопов, многоэтажные каркасные здания и др. Сооружения нового поколения по сравнению с построенными ранее являются более гибкими и легкими, имеют слабые демпфирующие характеристики, обладают повышенной чувствительностью к действию динамических нагрузок. Основным расчетным фактором для высотных сооружений является ветровое воздействие, а в сейсмически активных районах - сейсмические нагрузки. Продолжительность воздействия ветра на высотные сооружения может достигать 31% времени эксплуатации. Явления, происходящие при обтекании сооружений потоком воздуха, способствуют возбуждению колебаний в конструкциях. Уменьшение уровня колебаний высотных сооружений при действии ветра с

помощью ДГК является актуальной задачей.

Цель работы. Цель работы состоит в разработке и реализации на ЭВМ численной методики определения оптимальных параметров линейных динамических гасителей колебаний деформируемых упругих систем при стационарных случайных воздействиях.

Научная новизна. Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. На базе метода конечных элементов получена расчетная динамическая модель, описывающая колебания распределенных линейных систем, оснащенных динамическими гасителями. На основе спектрального подхода и методов оптимального проектирования разработана численная методика определения оптимальных параметров динамических гасителей колебаний, возбуждаемых стационарными случайными воздействиями.

Практическая ценность. Предложенная численная методика реализована в пакете прикладных программ для ЭВМ, с помощью которого выполняются все этапы расчета по подбору оптимальных параметров динамических гасителей для линейных распределенных систем, подвергающихся стационарным случайным воздействиям.

Исследованы три высотных сооружения башенного типа при стационарном случайном воздействии пульсирующей продольной составляющей ветровой нагрузки. Для этих объектов подобраны оптимальные параметры динамических гасителей.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с общим планом исследований, проводимых на кафедре строительной механики Киевского государственного технического университета строительства и архитектуры и в Научно-исследовательском институте строительной механики Министерства образования Украины при КГТУСА. Тематика работы определяется исследованиями, проводимыми в рамках темы "Создание интегрированной автоматизированной системы научных исследований для решения задач надежности и долговечности в строительстве" (номера гос. регистрации UA 01013447 P), которая выполняется по программе Министерства образования "Создание интегрированной системы компьютеризации проектных и научно-исследовательских работ в строительстве, которые обеспечивают надежность и долговечность конструкций и сооружений".

Результаты расчета, полученные в диссертационной работе, будут учитываться при разработке проекта реконструкции башни Киевского телецентра Институтом "УКРНИПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ" /г. Киев/.

Достоверность. Достоверность полученных результатов была проверена на различных стадиях разработки численной методики. Адекватность применяемых расчетных динамических моделей конструкций, оснащенных ДГК,

подтверждена путем сравнения результатов исследования, полученных с помощью моделей, построенных на основе различных подходов. Достоверность результатов по анализу случайной реакции рассматриваемой системы была обоснована путем применения и последующего сопоставления двух независимых методов статистической динамики. Оптимальность полученных параметров ДГК была подтверждена путем сравнения с результатами других авторов, а также на основе графических подходов нелинейного программирования.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и обсуждены на LIV^{са} и LV^{са} научно-технических конференциях Киевского государственного технического университета строительства и архитектуры.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 2 научные работы.

Личный вклад диссертанта состоит в разработке численной методики определения оптимальных параметров динамических гасителей колебаний сложных механических систем, находящихся под действием случайных нагрузок.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы (178 наименований); изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 60 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводится ретроспективный анализ развития исследований в теории пассивного динамического виброгашения механических систем, дан обзор методов решения задач в линейной постановке, формулируется цель работы.

Особенности конструкции ДГК и способ его применения зависят прежде всего от характера действия нагрузок на сооружения и от того, какие колебания требуется гасить. В первых исследованиях, проведенных в начале XX века, рассматривался ДГК без демпфирования при гармонических нагрузках. Такой гаситель настроен на одну частоту колебаний, т.е. не устраняет опасных колебаний конструкции при изменении частоты возмущения. Учет демпфирования в гасителе позволяет повысить их эффективность в более широком диапазоне частот. В настоящее время активно развиваются исследования вопросов гашения колебаний, возбуждаемых нагрузками более общего типа.

В СНГ основные результаты в области пассивного виброгашения, отражающие современное состояние проблемы, изложены в работах Коренева Б.Г., Резникова Л.М., Абдувалиева А.А., Беловодского В.Н., Вол-

кова С.Н., Горелова Ю.Н., Горского В.Н., Каникова А.А., Маркова И.В., Корнеева А.Б., Милосердова И.В., Радыша Ю.В., Рябцева О.И., Филлипова Л.О. и др. За рубежом, особенно в США и Японии, данной теме уделяется большое внимание, о чем свидетельствует большое количество работ, вышедших за последние годы, в числе которых можно отметить труды Igussa Takeru, Jourdov I.N., Kawashima T., Kaweski J., Liang Yau-chun, Onoda J., Ozguven H.N., Modi U., Sekiguchi H., Vakakis A.F., Van Dao N. и др.

Процесс защиты конструкции от высокого уровня колебаний с помощью гасителей при различных воздействиях представляет собой взаимодействие трех разных по существу математических моделей: модели упругой конструкции, модели динамического гасителя колебаний и модели внешнего воздействия. Эти три модели связаны с помощью уравнений движения, описывающих колебания динамической системы конструкция - ДГК. Определяющим моментом при рассмотрении задач виброзащиты является разработка методов анализа реакции системы конструкция - ДГК при различных воздействиях. Успешное решение этой проблемы позволяет исследовать круг вопросов, связанных с оптимизацией параметров ДГК. Применение тех или иных методов зависит существенно от типа воздействия на конструкцию и от линейности или нелинейности уравнений, описывающих колебания механической системы.

Методам анализа реакции линейных механических систем при стационарных случайных воздействиях посвящены работы Болотина В.В., Аугусти Г., Гусева А.С. и др.

В настоящей работе рассматриваются вопросы, связанные с гашением колебаний высотных гибких сооружений, возбуждаемых продольной пульсирующей компонентой ветрового давления. Целый ряд авторов, таких как Мазурин А.И., Симиу Э., Цейтлин А.И., Аугусти Г. и др., занимающихся вопросами воздействия ветра на сооружения и конструкции, приходят к выводу о том, что модель ветрового давления можно представить в виде стационарного случайного процесса. При этом пульсирующая составляющая ветровой нагрузки задается спектральной плотностью продольных скоростей ветра. Предложены различные варианты спектра продольных скоростей ветра: спектр Хино, Сома, Кармана, Давенпорта, Фихтеля и Мак - Вейла, Пасквиллаи т.д. Среди указанных моделей самой удобной для практического использования является модель спектра Давенпорта, которая достаточно проста и экспериментально надежно обоснована.

При решении задач оптимизации параметров ДГК применяются методы теории оптимального проектирования деформируемых систем. Эти методы

разработаны в трудах Баничука Н.В., Атрека Э., Хога Э., Арора Я., Рейтмана М.И. и др. Методы оптимального проектирования базируются на теории нелинейного математического программирования. Данной области математики посвящены работы Химмельблау Д., Банди Б. и др.

В первой главе излагается численная методика формирования дискретных динамических моделей высотных сооружений, оснащенных динамическими гасителями колебаний. Строится векторный случайный процесс, моделирующий приведенную узловую нагрузку, соответствующую ветровому воздействию на конструкцию. Для редукции дискретной динамической модели большой размерности применяется метод обобщенных координат.

Важным моментом в задачах о виброгашении является выбор расчетной динамической схемы конструкции с присоединенными ДГК и выбор математической модели системы, описывающей колебания защищаемой конструкции и ДГК. В настоящее время среди численных методов дискретизации континуальных систем в инженерной практике наиболее часто применяется метод конечных элементов. В данной работе в качестве исследуемых объектов рассматриваются сооружения башенного типа, которые представляют собой пространственные решетчатые металлические стержневые конструкции. Конечно-элементная модель сооружения строится путем использования стержневых конечных элементов, повторяющих конструктивные особенности несущих элементов.

По аналогии с принципиальной схемой Ден-Гартога для системы с двумя степенями свободы напишем систему уравнений, описывающих свободные колебания упругой защищаемой конструкции и присоединенных динамических гасителей колебаний (рис. I, а):

$$\begin{aligned} M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) + C' \dot{x}'(t) - C' \dot{x}'(t) + K' x'(t) - K' x'(t) &= 0, \\ M' \ddot{x}'(t) + C' \dot{x}'(t) + K' x'(t) - C' \dot{x}(t) - K x(t) &= 0, \end{aligned} \quad (I)$$

где $x^T(t) = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ - вектор функций перемещений узлов конструкции, $x'^T(t) = [x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n]$ - вектор функций перемещений динамических гасителей колебаний; n - количество степеней свободы; M , K и C соответственно матрицы масс, жесткости и демпфирования защищаемой конструкции размерностью $n \times n$, $M' = \text{diag}(M'_i)$, $K' = \text{diag}(K'_i)$ и $C' = \text{diag}(C'_i)$, $i = 1, n$ - соответственно диагональные матрицы масс, жесткости и демпфирования динамических гасителей колебаний, 0 - нулевой вектор - столбец.

Следует отметить, что в конкретных расчетах некоторые гасители, указанные в схеме на рис. I, а могут отсутствовать. Соответствующие элементы диагональных матриц M' , K' и C' принимают нулевые значения. Именно ненулевые элементы диагональных матриц M' , K' и C' являются

теми параметрами, которые определяются в процессе решения задач оптимизации.

Продольная скорость ветра может представляться в виде суммы средней и пульсационной компонент:

$$v(t) = \bar{v} + v(t), \quad (2)$$

где \bar{v} - средняя скорость ветра; $v(t)$ - пульсационная составляющая скорости ветра, которая представляет собой стационарный случайный процесс.

Для описания вероятностных характеристик пульсирующей компоненты ветровой нагрузки используется спектр Давенпорта. Двухсторонняя спектральная плотность задается выражением:

$$S_{vv}(\omega) = \frac{2 \pi K_0 \bar{v}^2 U^2}{\omega (1 + U^2)^{4/3}}, \quad (3)$$

где \bar{v} - средняя часовая скорость ветра на стандартной высоте анемометра (10 м); K_0 - коэффициент лобового сопротивления подстилающей поверхности; $U = \frac{\omega L}{2 \pi \bar{v}}$ - приведенная частота ($L = 1200$ м - масштаб длины).

При принятой модели конструкции (рис. 1, а) динамическая нагрузка представляется системой сосредоточенных сил, направленных параллельно скорости ветра. Действующая динамическая ветровая нагрузка определяется соотношением:

$$f = \gamma v(t), \quad (4)$$

где $v(t)$ - центрированный случайный процесс, задаваемый своей спектральной плотностью, $\gamma = [\gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_n]^T$ - вектор пространственного распределения ветровой нагрузки. Компонента γ_1 вектора γ задается формулой:

$$\gamma_1 = \rho \bar{v}_1 H_1^2 C_1, \quad (5)$$

где H_1 - характерный размер тела; C_1 коэффициент лобового сопротивления и ρ - плотность воздуха.

Уравнения, описывающие колебания конструкций, оснащенных динамическими гасителями (I), при действии на сооружения стационарной случайной ветровой нагрузки (4), записываются в виде:

$$\begin{aligned} M \ddot{x} + C \dot{x} + K x + C' \dot{x} - C' \dot{x}' + K' x - K' x &= f \\ M' \ddot{x}' + C' \dot{x}' + K' x' - C' \dot{x} - K' x &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

При описании реальных конструкций система (6) имеет часто порядок десятка тысяч. Анализ такой системы сталкивается с вычислительными трудностями. Принципиальным моментом здесь является редукция системы (6), которая проводится методом обобщенных координат. Вектор перемещений конструкции представляется в виде:

$$x(t) = \Phi y(t), \quad (7)$$

где $y^T(t) = [y_1(t) y_2(t) \dots y_n(t)]$ - обобщенные координаты, Φ - ма -

трица размерностью $m \times m$, образованная m векторами, описывающими формы собственных колебаний конструкций.

С учетом представления (7) система (6) переписывается следующим

$$\ddot{y} + D \dot{y} + G y + D' \dot{y}' + G' y' - \Phi^T C' \dot{x}' - \Phi^T K' x' = p v(t),$$

$$M' \ddot{x}' + C' \dot{x}' + K' x' - C' \Phi \dot{y} - K' \Phi y = 0, \quad (8)$$

где $G = \text{diag}(\omega_1^2)$, $D = \text{diag}(2\xi_1 \omega_1)$ - соответственно диагональные матрицы жесткости и демпфирования конструкции в обобщенных координатах ($i = 1, m$), $G' = \Phi^T K' \Phi$; $D' = \Phi^T C' \Phi$ а $p = \Phi^T r$.

Систему уравнений (8) можно записать в виде:

$$\ddot{z}(t) + A \dot{z}(t) + B z(t) = p v(t), \quad (9)$$

где: $z^T(t) = [y_1(t) \ y_2(t) \dots y_m(t) \ x'_1(t) \ x'_2(t) \dots x'_n(t)]$,

$$A = \begin{bmatrix} D + D' & -\Phi^T C' \\ \hline -(M')^{-1} C' \Phi & (M')^{-1} C' \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} G + G' & -\Phi^T K' \\ \hline -(M')^{-1} K' \Phi & (M')^{-1} K \end{bmatrix},$$

$$p^T(t) = [p_1, p_2, \dots, p_m, 0, \dots, 0].$$

Во второй главе излагаются численные методы оптимизации параметров динамических гасителей колебаний упругих систем при стационарном случайном воздействии.

Матрица спектральных плотностей $S_z(\omega)$ стационарного решения системы (9) имеет вид:

$$S_{zz}(\omega) = W S_{qq}(\omega) W^{*T}, \quad (10)$$

где $W(i\omega) = \|\ -\omega^2 I + i\omega A + B \ \|^{-1}$ - передаточная функция системы конструкция-ДГК, имеющая смысл динамической податливости, $S_{qq}(\omega) = p S_{vv}(\omega) p^{*T}$ - матрица спектральных плотностей внешней нагрузки, I - единичная матрица и $*$ - обозначает переход к комплексно-сопряженным величинам.

В настоящее время помимо спектрального метода исследования реакции систем применяется весьма общий численный метод статистической динамики - Метод Монте - Карло. Он позволяет исследовать не только линейные, но и нелинейные системы. С помощью этого метода можно исследовать колебания систем при нестационарных случайных нагрузках, что расширяет класс рассматриваемых задач по виброгашению. К такому классу относятся задачи гашения колебаний сооружений при сейсмических воздействиях. В диссертации метод Монте - Карло применяется наряду со спектральным методом. Использование двух независимых методик позволяет получать независимые решения рассматриваемых задач и проводить сравнительную оценку.

Матрица спектральных плотностей $S_{zz}(\omega)$ размерностью $(m+n, m+n)$ содержит подматрицы размерностью $m \times m$ спектральных плотностей обобщенных перемещений $S_{yy}(\omega)$ и спектральных плотностей перемещений динамических гасителей колебаний $S_{x'x'}(\omega)$ размерностью $n \times n$. С использованием (7) спектральная матрица $S_{xx}(\omega)$ размерности $2n \times 2n$, элементами которой являются взаимоспектральные плотности компонент вектора $\tilde{x}^T(t) = [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \dots \ \tilde{x}_{2n}] = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n \ x'_1 \ x'_2 \ \dots \ x'_n]$, (II) выражается следующим образом:

$$S_{xx}(\omega) = \tilde{\Phi} S_{zz}(\omega) \tilde{\Phi}^T = \tilde{\Phi} W P P^T W^{*T} \tilde{\Phi}^T S_{vv}(\omega) = H_{xx}(\omega) S_{vv}(\omega), \quad (I2)$$

где матрица $\tilde{\Phi}$ размерности $n \times 2n$ получается из матрицы Φ путем добавления n нулевых столбцов. Дисперсия перемещений 1-той компоненты вектора \tilde{x} определяется выражением:

$$D_{x_1} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1 x_1}(\omega) d\omega. \quad (I3)$$

В задачах оптимизации параметров ДГК большую роль играет формирование расчетных моделей систем конструкция-ДГК. Это связано с необходимостью проведения многократных расчетов в процессе оптимизации параметров гасителей. При изменении параметров гасителей динамические характеристики системы конструкция-ДГК эволюционируют. Это значит, что на каждом шаге оптимизации меняются собственные векторы и собственные частоты, что влечет за собой перестройку расчетной модели системы в целом. Вышеизложенный способ описания колебаний системы конструкция - ДГК (9) не требует перестройки системы в целом и является эффективным для решения оптимизационных задач.

С математической точки зрения конечномерная задача оптимального проектирования ДГК сводится к отысканию неизвестного вектора параметров ДГК $b^T = [K'_1, C'_1, M'_1, K'_2, C'_2, M'_2, \dots, K'_n, C'_n, M'_n]$ из условия минимума некоторого функционала F . Минимизирующий функционал характеризует выбранный критерий оптимальности. Минимизирующим функционалом могут быть любые характеристики реакции конструкции, а также усилия в самих нагруженных элементах конструкции. В настоящей работе минимизирующим функционалом является дисперсия колебаний 1-того узла конструкции (I3):

$$F = D_{x_1}(b) \quad (I4)$$

Параметры ДГК связаны с дисперсиями перемещений узлов конструкции с помощью систем дифференциальных уравнений (9) - уравнений состояния. Кроме уравнений состояния параметры ДГК должны удовлетворять разнообразным требованиям технического и технологического характера, которые могут быть формализованы в виде системы равенств и нера-

венств:

$$\begin{aligned} \psi_j(b) &= 0 & ; j=1, \dots, l; \\ \psi_j(b) &\leq 0 & ; j=l+1, \dots, k; \end{aligned} \quad (15)$$

В задачах, соответствующих действительным физическим процессам, целевая функция обычно обладает единственным экстремумом. В задачах виброгашения при оптимизации параметров ДГК в постановке без ограничений приходят иногда к таким параметрам ДГК, которые на практике неосуществимы или которым соответствуют нереальные характеристики хода гасителей. Таким образом, учет ограничений (13) при нахождении оптимальных параметров ДГК является необходимым условием.

Задача оптимального проектирования ДГК может быть теперь сформулирована следующим образом. Найти вектор оптимальных параметров ДГК $b_{\text{опт}}$, доставляющих минимум дисперсии перемещений 1-го узла конструкции (14) при заданных ограничениях (15). Для конечномерных задач оптимального проектирования вида (13) и (15) необходимые условия оптимальности имеют вид: если $b_{\text{опт}}$ является оптимальным решением, то существуют такие действительные числа λ_j и неотрицательные γ_j , что

$$\nabla \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_1}(\omega, b_{\text{опт}}) d\omega + \sum_{j=1}^l \lambda_j \nabla \psi_j(b_{\text{опт}}) + \sum_{j=l+1}^k \gamma_j \nabla \psi_j(b_{\text{опт}}) = 0, \quad (16)$$

где ∇ — набла-оператор, обозначает градиент соответствующей функции. Числа λ_j и γ_j можно интерпретировать как множители Лагранжа. Функции $D_{x_1}(b)$ и $\psi_j(b)$ имеют сложную математическую структуру, в силу чего производные приходится вычислять численно.

Для решения оптимизационных задач в данной работе применяется один из самых распространенных методов оптимального проектирования — метод проекции градиента с коррекцией невязки в ограничениях.

В третьей главе решаются задачи, связанные с оптимизацией параметров ДГК при стационарном случайном воздействии ветрового давления для трех реальных сооружений башенного типа

Для каждого сооружения исследования выполняются в следующей последовательности: строится динамическая модель, определяются частоты и формы собственных колебаний без учета гасителей, выполняется анализ вынужденных колебаний конструкции без учета гасителей под действием ветрового давления, производится расчет по подбору оптимальных параметров динамических гасителей колебаний.

Первым объектом исследования является вытяжная труба высотой 180 м в г. Днепродзержинске. Для данного сооружения в результате применения гасителя размах колебаний уменьшился в 1.8 раза. Данный

объект служил также в работе для отработки, тестирования и апробации методики.

Вторым объектом исследования является телевизионная башня в г. Санкт-Петербурге высотой 315 м. Общий вид конструкции показан на рис. 1, б. Сооружения находится в стадии реконструкции, вследствие чего меняются динамические характеристики. В связи с этим возник вопрос о гашении колебаний с помощью ДГК. На рис. 1, е и и представлены результаты анализа реакции сооружения без учета гасителей на пульсацию ветровой нагрузки. На рис. 1, и приведена спектральная плотность перемещений вершины башни $S_{x_1 x_1}^{\sim}(\omega)$, которая в силу (II) равна произведению функции $H_{x_1 x_1}^{\sim}(\omega)$ на спектр Давенпорта (рис. 1, г). Дисперсия перемещений вершины башни определяется с помощью интеграла (12). Амплитуда колебаний вершины башни $A_{x_1} = \sqrt{2D_{x_1}} = 1.5$ м.

Предложены два варианта размещения гасителей (рис. 1, в). В первом варианте рассматривается установка двух гасителей типа ДГКП-10 массой 13 т каждый на отметке 187 м. Второй вариант предполагает размещение одного гасителя типа ДГКП-20 массой 1.6 т на отметке 301.5 м и двух гасителей типа ДГКП-10 каждый массой 13 т на отметке 187 м.

Для первого варианта были решены следующие оптимизационные задачи. Определены оптимальные параметры ДГК-10 K_2' и C_2' , доставляющие минимум дисперсии перемещений верхнего узла конструкции $D_{x_1}(K_2', C_2')$. На рис. 1, ж и к (кривые 1) приведены результаты анализа реакции системы. Передаточные характеристики системы представлены функцией $H_{x_1 x_1}^{\sim}(\omega)$ (рис. 1, ж). Эта функция, в отличие от показанной на рис. 1, е имеет два максимума, что обусловлено влиянием гасителей и первой собственной частоты колебаний системы. Спектральная плотность $S_{x_1 x_1}^{\sim}(\omega)$ изображена на рис. 1, к. Амплитуды колебаний сооружения уменьшились в 1.66 раза по сравнению с амплитудами колебаний конструкции без учета гасителей. При решении поставленной задачи ход гасителя достигает 1.1 м. Исходя из конструктивных соображений были наложены ограничения на ход гасителя, решалась задача об оптимизации параметров ДГК при условии $A_{x_1} \leq 1.0$ [м]. Кривые, характеризующие колебания системы башня-гаситель ДГКП-10 с учетом ограничений, изображены на рис. 1, ж и к (кривые 2). Как видно из графика 1, ж, наличие ограничений незначительно сказывается на эффективности гашения. Полученные амплитуды колебаний сооружения с учетом гасителей были уменьшены в 1.6 раза.

На рис. 1, д показаны изолинии амплитуды колебаний вершины башни (сплошной линией) и динамического гасителя (пунктиром). На этом графике изображены пути поиска безусловного локального $\langle I \rangle$ и услов-

ного <2> минимумов. В теории оптимального проектирования при числе оптимизационных параметров один или два линии уровня являются основой графического подхода при решении задач оптимального проектирования. Этот подход основан на графическом изображении минимизируемой функции.

Для второго варианта была решена безусловная оптимизационная задача параметров гасителей ДГКП-10 (C_2', K_2') и ДГКП-20 (C_1', K_1'). Были определены оптимальные параметры ДГК K_1^{opt} и C_1^{opt} и K_2^{opt} и C_2^{opt} , доставляющие минимум дисперсии перемещений верхнего узла конструкции $D_{x_1}(K_1', C_1', K_2', C_2')$. Поставленная задача решается в четырехмерном пространстве проектирования. По мере увеличения количества варьируемых параметров увеличивается и длительность процесса сходимости оптимизационных задач. На рис. 1, з и л (кривые 1) изображены передаточные характеристики системы $H_{x_1 \tilde{x}_1}(\omega)$ и спектральная плотность $S_{x_1 \tilde{x}_1}(\omega)$. Функция $H_{x_1 \tilde{x}_1}(\omega)$ имеет три максимума, что обусловлено влиянием двух гасителей и низшей частотой системы. Амплитуда колебаний уменьшилась в 1.8 раза по сравнению с амплитудой колебаний башни без гасителей. Амплитуды колебаний гасителей ДГКП-10 и ДГКП-20 соответственно равнялись $A_{x_1'} = 3.22$ м и $A_{x_2'} = 0.924$ м. На амплитуды колебаний гасителей были наложены следующие ограничения: $A_{x_1'} \leq 1$ м и $A_{x_2'} \leq 0.85$ м. Соответствующие кривые $H_{x_1 \tilde{x}_1}(\omega)$ и $S_{x_1 \tilde{x}_1}(\omega)$ представлены на рис. 1, з и л (кривые 2). Амплитуда колебаний вершины башни уменьшилась в 1.6 раза.

Результаты исследований данного сооружения сравнивались с данными расчета, выполненного Центром экономических и научно-технических услуг "ЭКОНТУС" /г. Днепропетровск/ в 1992 г. по заказу проектировщика телевизионной башни "Укрниипроектстальконструкция" г. Киев.

В первом варианте расчета полученные оптимальные параметры (K_2', C_2') отличались на 0.6% от данных расчета, выполненного ЦЭНТУ. Во втором варианте эффект гашения в настоящей работе и в расчете ЦЭНТУ совпадает. Однако необходимо отметить что в расчете ЦЭНТУ этот результат достигается при значительно более высоком значении параметра демпфирования.

Третьим объектом, рассматриваемым в настоящей диссертационной работе, является телевизионная башня в г. Киеве высотой 380 м. Общий вид конструкции показан на рис. 2, а.

Также как и предыдущее сооружение, эта телевизионная башня находится в стадии реконструкции, актуальным является вопрос об уменьшении уровня ее колебаний.

Спектр Давенпорта скоростей ветра в районе г. Киева изображен на рис. 2, г. Расчет колебаний башни без гасителей (рис. 2, ж и к)

дает амплитуду колебаний $A_{x_1} = 3.7 \text{ м}$.

Было предложено три варианта размещения гасителей. Первый вариант предусматривает установку двух гасителей: одного (ДГК-1) массой 2 т на отметке 374.103 м, а второго (ДГК-2) массой 20 т на отметке 201.185 м. При втором варианте ставится один гаситель ДГК-2 на отметке 201.185 м массой 20 т. В третьем варианте предусматривается один гаситель ДГК-1 на отметке 374.103 м массой 2 т. Расчетная модель конструкции с присоединенными ДГК показана на рис. 2, б и в.

Для первого варианта размещения гасителей в результате решения задачи безусловной оптимизации параметров K'_1, C'_1, K'_2 и C'_2 амплитуды колебаний конструкции были уменьшены в 1,8 раза (рис. 2, з и л, кривые 1). Однако ход гасителей ($A_{x'_1} = 8.5 \text{ м}$ для ДГК-1 и $A_{x'_2} = 2.0 \text{ м}$ для ДГК-2) превышал допустимые пределы. В связи с этим была решена оптимизационная задача с учетом ограничений на ход гасителей: $A_{x'_1} \leq 1.1 [\text{м}]$, $A_{x'_2} \leq 1.0 [\text{м}]$ (рис. 2, з и л, кривые 2). При этом амплитуда колебаний вершины башни уменьшилась всего в 1,17 раза.

По такой же схеме были решены оптимизационные задачи для второго и третьего вариантов. В результате решения безусловной оптимизационной задачи для второго варианта амплитуды перемещений конструкции были уменьшены в 1,3 раза, а с учетом ограничений в 1,1 раза.

Для третьего варианта безусловная оптимизация параметров ДГК дала уменьшение амплитуд перемещений конструкции в 1,7 раза, а ход гасителя достигал 9 м. После решения задачи с учетом ограничений амплитуды перемещений конструкции были уменьшены в 1,08 раза.

Киевская телевизионная башня характеризуется жестким стволом и гибкой антенной частью. Здесь главной задачей является уменьшение колебаний антенной части конструкции. Однако, как показали приведенные выше исследования, при гашении колебаний с учетом ограничений на ход гасителей ни в одном из рассмотренных вариантов желаемого эффекта гашения не дает. Это обстоятельство объясняется различием в характере расположения изолиний амплитуд колебаний верхней точки первой (рис. 1, д) и второй (рис. 2, д и е) башен. В первом случае точки локального минимума (1) и условного минимума (2) находятся в районе одних и тех же параметров гасителя. Во втором случае точки (1) и (2) лежат в разных областях. Это обуславливает существенные различия кривых 1 и 2 на рис. 2, з и и.

Для Киевской башни был проведен расчет динамического гашения с большей массой гасителей. С ростом массы гасителей увеличивается эффект гашения, однако этот рост происходит медленно. Для желаемого

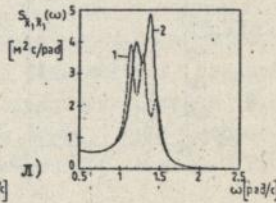
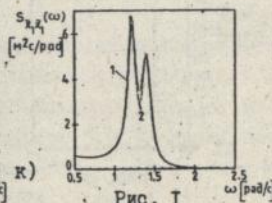
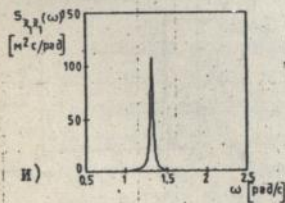
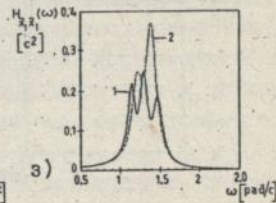
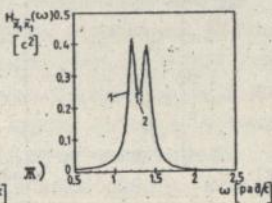
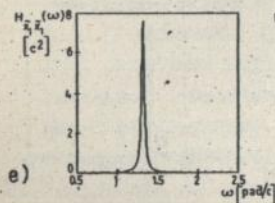
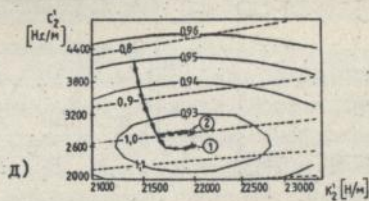
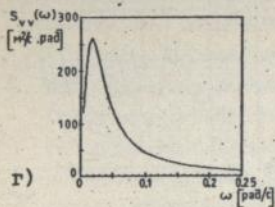
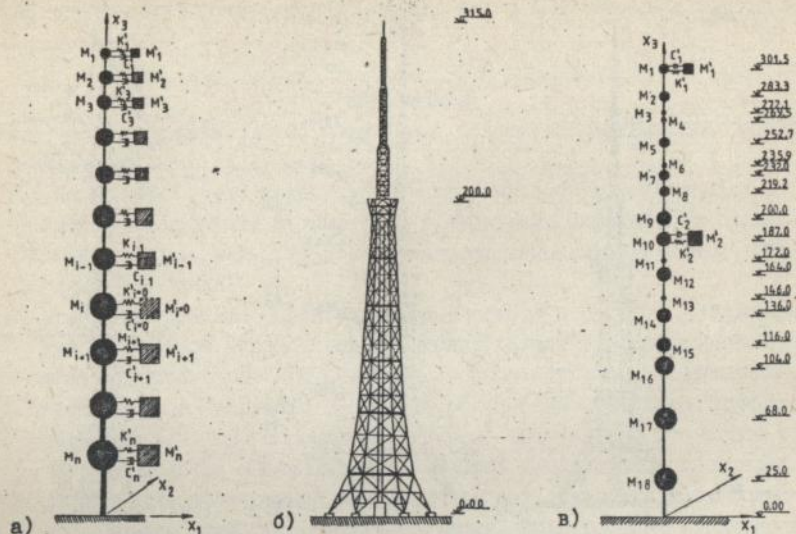


Рис. I

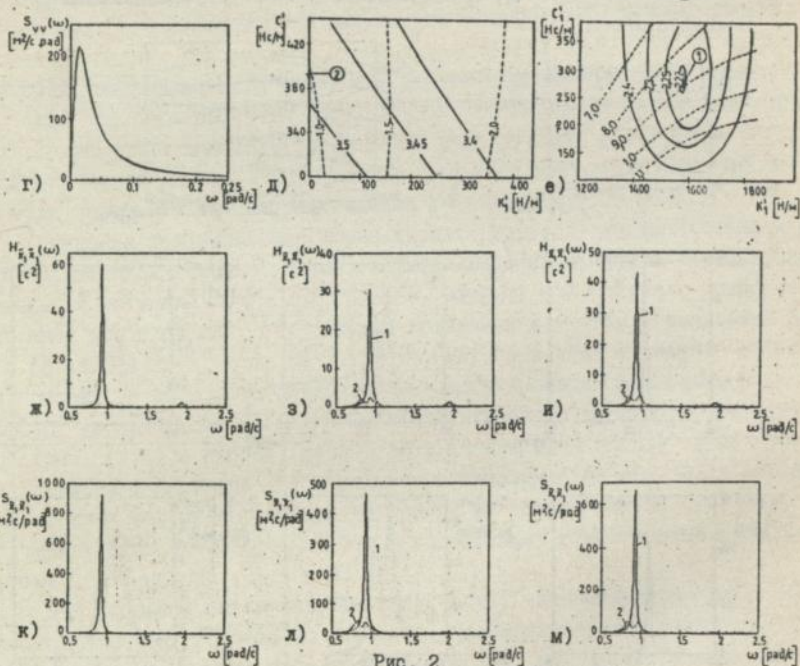
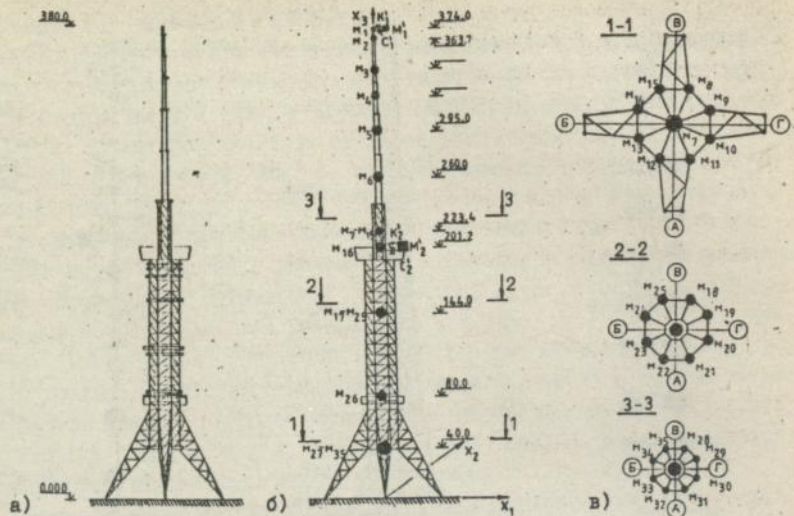


Рис. 2

эффекта гашения потребуются большие массы ДГК, что на практике неосуществимо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в ходе диссертационных исследований, состоят в следующем:

1. На основе метода конечных элементов разработана численная методика формирования математических моделей, описывающих колебания линейных распределенных систем, оснащенных динамическими гасителями колебаний.
2. На основе синтеза спектрального подхода и методов оптимального проектирования разработана численная методика определения оптимальных параметров ДГК при стационарном случайном воздействии.
3. Предложенная численная методика реализована в пакете прикладных программ для ЭВМ, с помощью которого выполняются все этапы расчета по подбору оптимальных параметров динамических гасителей колебаний для конструкций при стационарных случайных воздействиях.
4. Исследованы три высотных сооружения, подверженных стационарному случайному ветровому воздействию. Для данных сооружений найдены с помощью предлагаемой методики оптимальные ДГК.
5. Достоверность полученных результатов была проверена на различных стадиях разработки численной методики. Достоверность результатов при формировании динамической модели конструкции, оснащенной динамическими гасителями, подтверждена путем сравнения с моделью, построенной на основе другого подхода. Достоверность результатов по анализу случайной реакции рассматриваемой системы была обоснована путем применения и последующего сопоставления двух различных методов статистической динамики. Достоверность оптимальности полученных параметров была подтверждена путем сравнения с результатами других авторов, а также на основе графических подходов нелинейного программирования.
6. Результаты диссертационной работы внедрены в институте "УКРНИИ - ПРОЕКТСТАЛЬКОНСТРУКЦИЯ" /г. Киев/.

Основное содержание диссертационной работы отражено в работах:

1. Численный подход к оптимизации параметров динамических гасителей колебаний при стационарном случайном воздействии /Баженов В.А., Дехтярук Е.С., Инчаusti Х.К.; Киев. гос. техн. ун-т стр-ва и архитектуры.- Киев, 1994.- 13 с.:ил.- Библиогр.:6 назв.- Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 24.II.94, № 2193 - Ук 94

2. Минимаксный подход к решению задач о динамическом виброгашении конструкций при случайных воздействиях/ Важенев В.А., Дехтярук Е. С., Инчаусти Х.К.; Киев. гос. техн. ун-т стр-ва и архитектуры.- Киев, 1994.- 13 с.:ил.- Библиогр.: 7 назв.- Рус.-Деп. в ГНТБ Украины 24.II.94, № 2192 - Ук 94
3. Борисенко В.К., Кацапчук А.Н., Инчаусти Х.К. Стационарная случайная реакция высотных сооружений, оснащенных динамическими гасителями колебаний// Тези доповідей 54-ї науково - практичної конференції і професорсько - викладацького складу, аспірантів і студентів.- К.: КІБІ, 1993.- 146 с.

Инчаусти Х.К. Динамическое гашение колебаний высотных сооружений при стационарных случайных воздействиях.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17 - строительная механика, Киевский государственный университет строительства и архитектуры, Киев, 1995.

Защита численная методика определения оптимальных параметров пассивных динамических гасителей колебаний конструкций, подверженных стационарным случайным воздействиям, позволяющая проводить исследования, связанные с динамическим виброгашением сложных механических систем, находящихся под действием случайных нагрузок.

Ключевые слова: динамические гасители колебаний, стационарные случайные нагрузки, методы оптимального проектирования, спектральный метод, метод обобщенных координат.

Inchausti J.C. Dynamic vibration damping of high structures subjected to stationary random excitations.

Thesis for the application of the Doctor of Philosophy (Ph.D) degree in Structural Mechanics, Kiev State Technical University of Construction and Architecture, Kiev, 1995.

Numerical methods are developed for the optimization of parameters of construction of passive dynamic absorbers, subjected to stationary random excitations. These methods permit to realize investigations connected with dynamic absorption of complex mechanical systems under random loads.

Подл. к печ. 28.12.94
 Бумага тип. № 3 . Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 093
 Услови. кр.-отт. 200 . Уч.-изд. л. 10
 Тираж 100 . Зак. № 4-6059 .

Формат 60x84/16

Фирма «ВИПОЛ»
 252151, г. Киев, ул. Вольнская, 60.



Ab 31.592

AB 31.592