

На правах рукописи

Шульженко Николай Григорьевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА
И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАНИЙ
В СИСТЕМЕ ТУРБОАГРЕГАТ - ФУНДАМЕНТ

01.02.06 - динамика, прочность машин,
приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Харьков - 1992

Шульженко



00819927 (-)

Работа выполнена в
Академии наук Украины.

Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Воробьев Ю.С.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Голоскоков Е.Г.;
доктор технических наук,
профессор Василенко Н.В.;
доктор технических наук,
профессор Швец В.Б.

Ведущее предприятие - Научно-производственное
объединение "Турбоатом".

Защита состоится " 18 " декабря 1992 года в 12.00
часов на заседании специализированного совета Д 068.39.06
при Харьковском политехническом институте (310002, г. Харь-
ков, ГСП, ул. Фрунзе, 21).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьков-
ского политехнического института.

Автореферат разослан " 5 " ноября 1992 года.

Ученый секретарь
специализированного совета,
канд. техн. наук, доцент

Бортовой В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Выработка и прирост электроэнергии на тепловых и атомных электростанциях осуществляются в основном за счет энергоблоков большой единичной мощности. Поэтому проблема обеспечения и повышения надежности их работы имеет важное народно-хозяйственное значение. Она решается на различных этапах - от проектирования до ремонта турбоагрегата и связанных с ним конструкций. Увеличение единичной мощности, рост габаритов и снижение материалоемкости агрегата повышают ответственность его частей за уровень вибраций и надежность динамической работы системы турбоагрегат - фундамент - основание (ТФО).

Одним из путей обеспечения динамической надежности турбоагрегата является достижение в заданном диапазоне частот вибрационных характеристик его частей, при которых выполнялось бы требование ограничения амплитуд колебаний цапф роторов и корпусов подшипников. Вибрационное состояние турбоагрегата определяется главным образом вибрационными свойствами валопровода, опор, корпусов, фундамента и их взаимным влиянием. Стремление к экономичности побудило отказаться от монолитных высоконастроенных конструкций и применять оборные железобетонные низконастроенные фундаменты. Для них характерен густой спектр собственных частот. Поэтому на практике вместо отстройки последних от рабочей частоты решается проблема достижения достаточно низкого уровня динамических податливостей верхнего строения. Обеспечение допустимого уровня вибраций во многом определяется качеством прогнозирования вибрационных характеристик как системы в целом, так и ее составных частей. Усовершенствование существующих, создание новых эффективных математических моделей и методов численного анализа и прогнозирования вибрационных характеристик, учитывающих взаимодействие систем элементов, представляют актуальную проблему динамики системы ТФО и ее частей.

Исследования по рассматриваемым в диссертации вопросам выполнялись согласно плану научно-исследовательских работ ИГиМаш АН Украины в соответствии с заданием по Государственным программам.

АН УРСР

Цель работы:

1) создание комплекса эффективных методов расчета, обеспечивающих оценку вибрационной прочности ТФО:

вибрационных характеристик при стационарных и нестационарных нагрузках, вероятностной оценки и рационального выбора параметров элементов верхней части рамных фундаментов турбоагрегатов, вибрационных характеристик фундаментов по более полным моделям с учетом элементов виброизоляции;

стационарных и нестационарных колебаний роторов на упругодемпферных опорах от неуравновешенных сил и при наличии трещины;

стационарных колебаний фундаментов с учетом влияния валопровода и статорных частей турбоагрегата;

2) анализ вибрационных характеристик и определение основных закономерностей колебаний в указанных системах, выработка рекомендаций по использованию полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в развитии математических моделей конструкций системы турбоагрегат - фундамент (ТФ); в создании методов расчета, основанных на расчленении системы: стационарных колебаний рассматриваемых стержневых конструкций с распределенными параметрами, не приводящих к значительным вычислительным погрешностям при исследовании систем с большим числом элементов; вибрационных характеристик рамных конструкций по избирательной методике с обоснованным упрощением расчетных математических моделей и последовательным решением систем алгебраических уравнений малых порядков; нестационарных колебаний стержневых конструкций с использованием эквивалентных совокупностей их стационарных решений и спектрального представления нагрузки; в разработке методов численного решения задач о колебаниях тяжелых роторов при наличии поперечной трещины со смыкающимися берегами и легких высокооборотных роторов на подшипниках, имеющих нелинейные характеристики; в выявлении особенностей колебаний в системе ТФ; в применении решения в точных функциях, учитывающих инерцию поворота и деформацию сдвига стержневых элементов при изгибе.

Достоверность основных положений и результатов диссертации оценивалась сопоставлением их с известными решениями для частных случаев, с данными расчетов по другим методикам и с

имеющимися экспериментальными данными, а также с положительным опытом реализации практических рекомендаций.

Практическая ценность и реализация результатов. Ценность работы состоит в создании эффективных методов расчета колебаний пространственных рамных фундаментов и валопроводов турбоагрегатов, взаимосвязанных колебаний частей системы ТФО, реализованных на наиболее распространенных ЭВМ; в выявлении вибрационных характеристик реальных конструкций системы; в разработке практических рекомендаций, направленных на повышение вибрационной прочности системы и ее частей.

Разработанные модели, методы и результаты расчетов внедрены и используются при анализе колебаний систем создаваемых и реконструируемых турбоагрегатов и фундаментов. Они применяются при решении задач рационального выбора параметров элементов и уменьшения материалоемкости, при внедрении более экономичных конструкций и элементов виброизоляции. По предложенным методикам выполнены расчеты колебаний фундаментов турбоагрегатов мощностью 50, 500, 750, 800, 1000, 1200 МВт (в том числе 50 и 1000 МВт с пружинной виброизоляцией) и выбраны на стадии проектирования оптимальные конструкции по вибрационным характеристикам и расходу материала. Методы расчета колебаний роторов использованы при определении критических частот и устойчивости валопроводов турбоагрегатов мощностью 300, 500, 1000 МВт, роторов турбокомпрессоров малой мощности и других систем.

Разработанные методы вошли в методические рекомендации Госстандарта по расчету вынужденных колебаний пространственных стержневых конструкций типа фундамент - основание и многопролетных роторов на упругодемпферных опорах. Методики расчета использованы в справочнике проектировщика "Динамический расчет специальных инженерных сооружений и конструкций" (М.: Стройиздат, 1986).

Результаты работы внедрены на предприятиях: Ленинградский НИПКИ "Атомэнергопроект", НПО "Турбоатом" (г. Харьков), ПО "Турбомоторный завод" (г. Екатеринбург), Харьковский НИПКИ "Энергопроект", Киевский НИПКИ "Энергопроект", Харьковское ЦКБ УПО "Энергопрогресс", п/я А-1877, ПО "АвтоКРАЗ" (г. Кременчуг). Суммарный экономический эффект от внедрения составляет 1215 тыс. рублей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Республиканской конференции "Воздействие динамических нагрузок на элементы конструкций" (Харьков, 1974); Всесоюзной конференции "Повышение надежности системы турбоагрегат - фундамент - основание мощных энергоблоков тепловых электростанций" (Москва, 1975); Республиканских конференциях "Математическое моделирование процессов и конструкций турбомашин" (Змиев, 1976, 1979, 1982, 1988, 1991); I и II Всесоюзных конференциях "Совершенствование расчета и проектирования зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям" (Харьков, 1978; Тбилиси, 1982); IV Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1978); IV тематической конференции "Практическая реализация численных методов расчета инженерных конструкций" (Санкт-Петербург, 1979); Всесоюзной конференции "Повышение эффективности ремонта и модернизации энергетического оборудования" (Москва, 1981); Всесоюзных совещаниях "Повышение надежности энергетических сооружений при динамических воздействиях" (Москва, 1981, 1987, 1991); V - VII Всесоюзных конференциях "Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений" (Ташкент, 1981; Нарва, 1985; Днепропетровск, 1989); I Республиканской конференции по повышению надежности и долговечности машин и сооружений (Киев, 1982); Всесоюзных конференциях по вибрационной технике (Телави, 1984; Кобулет, 1987); Всесоюзной конференции по проблемам надежности и ресурса в машиностроении (Самара, 1986); XXII и XXIII Всесоюзных научных совещаниях по проблемам прочности двигателей (Москва, 1988, 1990); XI Всесоюзной конференции "Конструкционная прочность двигателей" (Самара, 1988); Всесоюзном совещании "Повышение вибрационной надежности паротурбинных агрегатов ТЭС и АЭС" (Москва, 1988); Всесоюзной конференции "Волновые и вибрационные процессы в машиностроении" (Нижний Новгород, 1989); II Всесоюзной конференции "Проблемы виброизоляции машин и приборов" (Иркутск, 1989); Czechoslovak Conference with International Participation "Dynamics of structures 89" (Karlovly Vary, 1989); II Всесоюзной конференции "Проблемы снижения материалоемкости силовых конструкций" (Нижний Новгород, 1989); II Всесоюзной конференции "Нелинейные колебания механических систем" (Нижний Новгород, 1990); IV Всесоюзном совещании "Динамика и прочность автомобиля" (Москва, 1990); Всесоюзной кон-

ференции "Надежность машин, математическое и машинное моделирование задач динамики" (Кишинев, 1991); II конференции "Вопросы надежности и оптимизации строительных конструкций, машин и механизмов" (Севастополь, 1991).

За разработку и внедрение методов расчета вынужденных колебаний пространственных стержневых конструкций (типа фундамент - основание агрегата), представленных на тематической выставке в павильоне "Электрификация СССР" в 1987 году, автор награжден Бронзовой медалью ВДНХ. За успешное выполнение работ по данной тематике ИПМаш АН Украины награжден Дипломами ГКНТ и ВЦСПС.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 78 работ, в том числе 2 монографии и 2 методические рекомендации, изданные по постановлению Госстандарта.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 10 разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 385 наименований, и приложения.

Основное содержание работы изложено на 372 страницах, включая 121 рисунок и 4 таблицы. Объем диссертации 439 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость работы, указаны способы апробации и связь ее с программами и планами научных исследований.

I. Состояние вопроса и задачи исследований. В области теоретических исследований колебаний системы ТФО можно выделить два направления. Одно связано с построением модели системы от фундамента к машине, другое - от валопровода к фундаменту с учетом факторов, определяющих ее вибрационное состояние (рис. 1).

Первые работы в области колебаний фундаментов турбин основаны на простейших дискретных представлениях, благодаря которым определяются собственные частоты системы. Их развитие осуществлено в исследованиях Р. Элерса, Э. Рауша, Д.Д. Баркана, О.А. Савинова, А.И. Абашидзе и др. Континуальные модели частей системы предложены Е.Л. Николаи, А.И. Лурье, А.П. Филипповым.

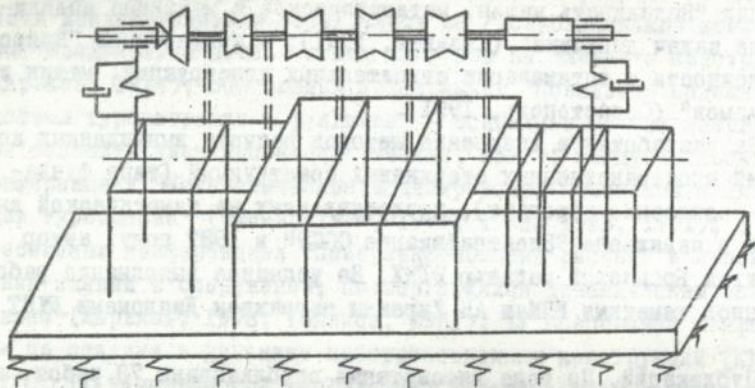


Рис. 1. Схема системы валопровод - фундамент - основание

Внедрение низконастроенных конструкций рамных фундаментов турбоагрегатов потребовало анализа их вынужденных колебаний по высшим формам и применения расчетных моделей с распределенными параметрами. Модели и методы расчета вибрационных характеристик таких конструкций рассматривались в работах В.М. Фридмана, И.С. Шейнина, О.Г. Виноградова, Ю.Н. Санкина, О.В. Приваловой, Б.В. Цейтлина, А.М. Жуковского. В них использовались идеи методов начальных параметров, динамических податливостей, конечных элементов, разложения решения по спектральным характеристикам стержней. В исследованиях зарубежных авторов в основном применялся метод конечных элементов.

Вопросы, связанные с созданием моделей и анализом колебаний фундаментов под турбоагрегаты, рассмотрены в работах И.С. Шейнина, В.И. Олимпиаева, Б.Г. Коренева, В.А. Ильичева, В.Б. Швеца, Б.Т. Рунова, А.И. Абашидзе, И.С. Литвина, Е.Г. Бабского, Ф.В. Сапожникова, И.И. Орлова, Г.Г. Аграновского, Н.С. Швеца, О.Я. Шехтер, М.А. Рабкина, В.Л. Седина, Г.Л. Кедровой, Я.Л. Кранцфельда.

При расчетах колебаний фундаментов турбоагрегат учитывался в основном инерционными характеристиками. В работах И.С. Шейнина, В.М. Фридмана, В.А. Киндера, Б.В. Цейтлина, О.В. Приваловой, И. Лунда, Э. Ванга, В. Горака рассматриваются способы расчета взаимосвязанных колебаний фундаментов и частей турбоагрегата: валопровода, корпусов цилиндров, генератора. Применяются методы конечных элементов, динамических жесткостей, синтеза

форм колебаний и суперпозиции гармонических колебаний с преобразованием Фурье. Вопросы анализа колебаний корпусов цилиндров с применением конечно-элементных моделей и взаимосвязанных колебаний в турбинах рассматривались С.И. Богомоловым, А.М. Журавлевой и С.К. Шелковым.

Исследования, основанные на построении модели системы ТФО от валопровода к фундаменту, тесно связаны с достижениями в области динамики роторов. Различные аспекты проблемы динамики роторов и методы их расчета развиты в трудах В.Л. Бидермана, И.А. Биргера, С.И. Богомолова, В.В. Болотина, А.Г. Бургвица, Е.Г. Голоскокова, Н.В. Григорьева, В.А. Грובה, А.Ф. Гурова, Ф.М. Диментберга, А.С. Кельзона, А.Г. Костюка, М.Я. Кушуля, В.И. Олимпиева, Э.Л. Позняка, Б.Т. Рунова, С.И. Сергеева, А.П. Филиппова, В.М. Фридмана, Д.В. Хронина, Б.Ф. Шорра, М. Балды, Р. Гаша, Е. Крамера, И. Лунда, Г. Томаса, А. Тондла и в работах их учеников.

Рассмотрены вопросы колебаний и устойчивости роторов турбоагрегатов на масляном слое подшипников (В.И. Олимпиев, Э.Л. Позняк, В.А. Агафонов, И. Лунд, Г. Томас), влияния сил парового потока (А.Г. Костюк, В.И. Олимпиев, Г. Томас, Е. Крамер). Усложнение модели опор валопровода турбоагрегата и учет влияния фундамента осуществлены в работах А.Г. Костюка, В.Ф. Шатохина, А.И. Куменко, В.Я. Кальменса, В.Л. Шибера, Е. Томаса, А. Кроока. Влияние поперечной трещины рассмотрено В.И. Олимпиевым, В. Грабовски, L. Nilsson, J. Majew и др. Колебания малоагруженных неуравновешенных роторов на масляном слое подшипников изучались Э.Л. Позняком, Г.А. Завьяловым, С.И. Левитаном, С. Ли и др.

При расчетах колебаний роторов в различных модификациях использовались методы начальных параметров, динамических жесткостей, конечных элементов и разложения решения по спектральным характеристикам элементов.

Краткий анализ указанных исследований и соответствующих разработок автора, приведенный в настоящем разделе, завершен формулировкой задач по созданию эффективных моделей, методов и алгоритмов расчета:

стационарных и нестационарных колебаний пространственных рамных фундаментов турбоагрегатов, в том числе с виброизоляцией, как систем с распределенными параметрами, для анализа и

прогнозирования вибрационных характеристик верхнего строения и рационального выбора параметров элементов при многовариантном проектировании с теоретическим анализом вибрационных характеристик ряда конструкций фундаментов реконструируемых и проектируемых объектов;

вибрационных характеристик стационарных колебаний рамных фундаментов с учетом упругоинерционных свойств корпусов цилиндров низкого давления, а также валопровода на выносных опорах с оценкой их влияния на амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) верхнего строения фундамента турбоагрегата;

стационарных и нестационарных поперечных колебаний многопролетных роторов турбин на упругодемпферных опорах, как систем с распределенными параметрами, для анализа их критических частот, форм, переходных процессов при внезапной разбалансировке и спектра вибрационных перемещений от поперечной трещины с проведением теоретических исследований и определением вибрационных характеристик роторов конкретных турбомашин;

нестационарных колебаний малонагруженных высокооборотных роторов с распределенными параметрами малогабаритных турбин на цилиндрических подшипниках скольжения, обладающих нелинейными свойствами, с оценкой влияния ускорения и кинематического возбуждения опор на переходные и самовозбуждающиеся колебания роторов с разной неуровненностью.

2. Вибрационные характеристики плоских поперечных участков системы турбоагрегат - фундамент. Рассматриваются стационарные колебания базовых элементов системы - поперечных участков, модели которых включают упруго-связанные массы ротора, опоры, нижней плиты и плоские рамы фундамента. Последние моделируются стержнями с упругими элементами в узлах. Основание под стойками задается моделью Винклера. Изгибные колебания стержней описываются уравнениями С.П. Тимошенко.

С помощью балочных функций уравнения движения сводятся к системе обыкновенных дифференциальных уравнений. Условиями сопряжения учитывается симметрия конструкции. Численные исследования проведены для двух- и трехстоечных участков фундаментов турбоагрегатов мощностью 300 и 1200 МВт. Первый имеет стойки меньшей относительной длины, второй - большей.

Анализ результатов свидетельствует о качественном их со-

ответствии для обеих систем. Учет инерции поворота и деформации сдвига стержней незначительно изменяет резонансные частоты и амплитуды вынужденных колебаний в областях частот, не превышающих рабочие в 1,5 раза. Изменение жесткости основания существенно влияет на первые резонансные частоты и амплитуды при вертикальном возбуждении (симметричные формы колебаний). Перемещения верхнего конца стойки при учете ее продольных колебаний соизмеримы со смещением середины ригеля. В случае возбуждения кососимметричных форм колебаний влияние продольной податливости стоек и основания незначительно. Изменение жесткости опоры существенно сказывается на характеристиках вынужденных колебаний вблизи парциальных частот системы ротор - опора - жесткое основание. Введение средней стойки мало отражается на характеристиках вынужденных колебаний при поперечном возбуждении. Если жесткости упругих элементов, расположенных между ригелями и стойками, в несколько раз меньше жесткостей остальных элементов рамы и основания, то вибрации мало передаются на стойку и основание, система работает в режиме виброизоляции нижнего строения фундамента. Уровень вибраций массы ротора и ригеля может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от свойств системы. Для кососимметричных форм колебаний влияние упругих элементов значительно меньше в связи с большей податливостью стоек в поперечном направлении. Приведенные результаты использованы при разработке моделей для анализа пространственных конструкций.

3. Общий метод расчета стационарных колебаний пространственных рамных фундаментов. Для прогнозирования вибрационных характеристик верхнего строения фундамента в местах установки агрегата он моделируется пространственной стержневой конструкцией с распределенными параметрами и жестко или упруго (при наличии виброизоляции) связанными элементами. Нижняя часть представляется упругоинерционными характеристиками в вертикальном направлении, которые определяются отдельно по моделям различной сложности или по экспериментальным данным. Стержневые элементы испытывают изгибные, продольные и крутильные деформации. Они описываются соответствующими уравнениями с учетом внутреннего трения по гипотезе Е.С. Сорокина. Последние дополняются условиями связи в узлах системы. Турбоагрегат

учитывается инерционными характеристиками.

Разработанный метод основан на использовании идеи расчета по частям. Система разделяется на две подсистемы, которые делятся на части. Каждая из них включает поперечную раму с продольными соединительными балками с одной стороны (рис. 2).

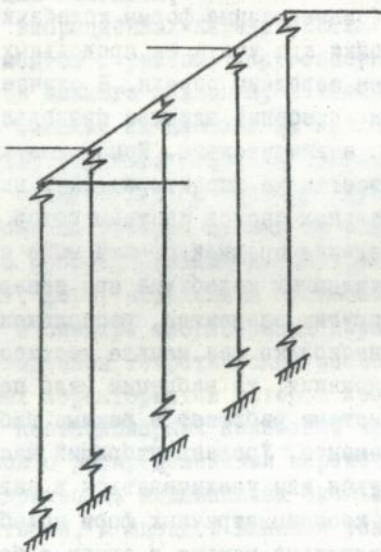


Рис. 2. Схема части фундамента

Поочередно решается задача о колебаниях частей с применением точных функций при описании движения стержней и условий для их сопряжения. Усилия $\{R_{\alpha, i}\}$ на краях стержневых элементов выражаются через перемещения $\{V_{\alpha, i}\}$

$$\{R_{\alpha, i}\} = \{H\} \{V_{\alpha, i}\} + \{N\} \{P\}, \quad (I)$$

где $\{H\}$, $\{N\}$ — матрицы упругоинерционных характеристик; $\{P\}$ — матрица внешней нагрузки; 0, 1 — индексы параметров соответственно для левого и правого краев.

Для каждой части число неизвестных больше числа уравнений на количество параметров, характеризующих перемещения соединительных балок на свободных краях. Это обстоятельство используется для нахождения рекуррентных зависимостей между параметрами $\{V_{\alpha, i}\}$ на краях этих балок из решения уравнений для части

$$\{V_{\alpha}\} = \{A\} \{V_i\} + \{B\} \{P\}. \quad (2)$$

С учетом зависимостей (I), (2) для продольной соединительной балки имеем

$$\{R_i\} = \{C\} \{V_i\} + \{D\} \{P\}. \quad (3)$$

Матрицы $\{A\}$, ..., $\{D\}$ содержат информацию об упругоинерционных свойствах данной части. Зависимости (3) затем использу-

ются при рассмотрении следующей части и отражают влияние на нее предыдущей. После определения соотношений, аналогичных (3), следуют рекуррентные зависимости для нахождения $\{C\}$ и $\{D\}$. Из условий сопряжения двух выделенных подсистем определяются параметры перемещений для узлов стыковки, а с использованием уравнений (2) - для остальных частей системы.

Метод развит с целью учета деформации сдвига и инерции поворота при изгибе стержней. Рассмотрены условия сочленения по оси и по высоте элементов, образующих общий узел конструкции. Показано, что применение первых приводит к противоречивым результатам. Поэтому условия сопряжения элементов в случае наличия указанных факторов должны отвечать сочленению их краев по высоте. При этом учитывается также деформация углов, образованных осями стержней. Получены аналитические значения функций (аналог коэффициентов динамических жесткостей), посредством которых силовые параметры на краях стержней наиболее просто выражаются через геометрические, учитывающие инерцию поворота и деформацию сдвига. Их использование при наличии этих факторов не требует переработки метода решения по уравнениям технической теории, если под углами поворота краев понимать углы по высоте элементов. Достаточно заменить несколько аналитических функций рекомендуемыми. Применение иных подходов к решению этой задачи влечет за собой существенную переработку алгоритма.

4. Избирательный метод расчета стационарных колебаний симметричных фундаментов. Разработка избирательного метода вызвана необходимостью создания по возможности более простых способов численного исследования вибрационных характеристик фундаментов, позволяющих применять ЭВМ небольшой мощности с приемлемыми затратами времени при многовариантных расчетах симметричных конструкций на этапе проектирования. В избирательном методе решения задачи, являющемся упрощенным по отношению к общему, учитываются не все виды деформаций элементов, а только те, которые вносят наибольший вклад в определяемые характеристики контрольных точек. При этом используются результаты анализа влияния параметров элементов на колебания плоских частей системы. Исходя из целей проектирования, предложены избирательные модели базовых частей фундаментов, отвечающих вертикальному симметричному и поперечному кососиммет-

ричному нагружениям. Инерция поворота и деформация сдвига при изгибе не учитываются, перемещения узлов системы вдоль оси турбоагрегата не рассматриваются.

Считается, что при вертикальном нагружении фундамента распределенными и сосредоточенными силами и моментами, не нарушающими симметрию поперечных участков, стойки работают на изгиб в двух направлениях и испытывают продольную деформацию, а ригели - на изгиб в вертикальных плоскостях и на кручение. Основание под каждой стойкой податливо в вертикальном направлении. Для уменьшения числа уравнений, описывающих поведение системы, поперечная балка не разделяется на несколько стержней в узлах сопряжения со смещенной продольной балкой, а рассматривается как один стержень. Получены соответствующие аналитические выражения для перемещений и усилий на краях поперечной балки, учитывающие влияние продольных балок.

При поперечном нагружении полагается, что стойки работают на изгиб в плоскости поперечных рам и на кручение, продольные балки - на изгиб в горизонтальной плоскости, поперечные - на изгиб в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Основание под каждой стойкой жесткое. В обоих случаях симметрия системы учитывалась условиями сопряжения, что дало возможность рассмотреть половину конструкции.

Предложенные избирательные модели в сочетании с разработанным методом расчета позволили значительно сократить число разрешающих уравнений, существенно уменьшить объем расчетной информации и создать менее емкие, но более быстродействующие программы расчета. Область использования данной методики по сравнению с общей ограничена избирательными моделями, описывающими симметричные конструкции и не учитывающими инерцию поворота, деформацию сдвига, податливость виброизоляции, осевое смещение узлов и некоторые виды деформации элементов, что вносит погрешность в определяемые характеристики.

5. Вибрационные характеристики фундаментов под турбоагрегаты большой мощности. С использованием общей и избирательной методик выполнены расчеты вибрационных характеристик ряда конструкций фундаментов турбоагрегатов различной мощности. Расчет собственных частот свидетельствует о значительной густоте спектра, о расположении рабочей частоты в этой области

частот и о целесообразности использования при проектировании фундаментов характеристик их вынужденных стационарных колебаний. Наибольший практический интерес вызывают динамические податливости конструкции в местах установки опор. Характеристики, полученные по обоим методикам, сравнивались между собой, о чем свидетельствует рис. 3.

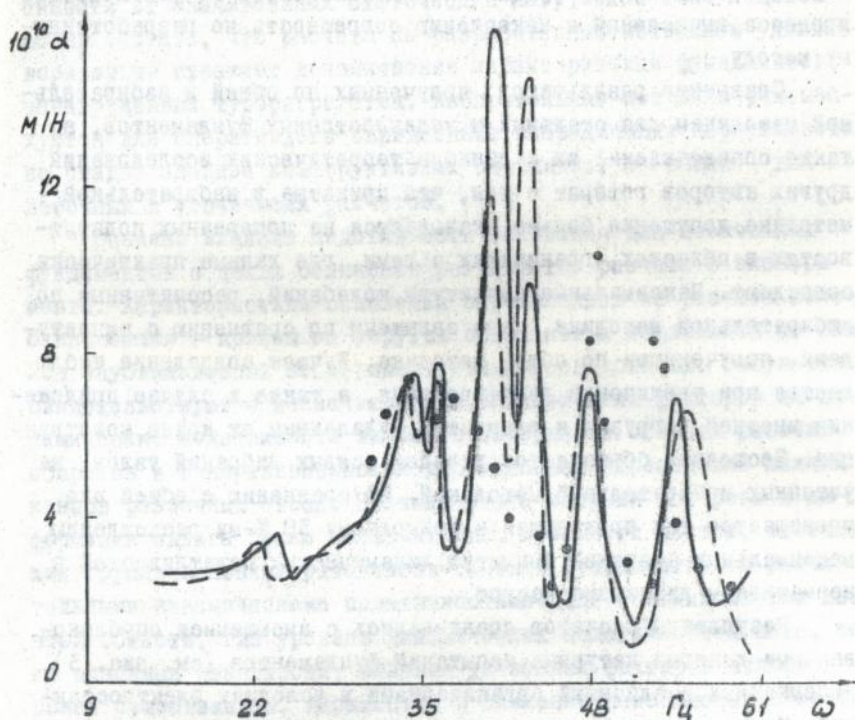


Рис. 3. Вертикальные податливости ненагруженного семипролетного фундамента турбоагрегата мощностью 500 МВт:

сплошные кривые - данные избирательной методики; пунктирные - общей; точки - экспериментальные значения^{ж)}

ж) Вибрационные характеристики турбоагрегата 500 МВт / Б.Т. Рунов, Г.С. Коваль, А.В. Салимон и др. // Электрические станции.- 1977.- № 6.- С. 30 - 34.

Затраты времени ЭВМ при расчете одноименных характеристик по программам избирательной методики в 10 - 100 раз меньше,

чем по общей. Расчетными исследованиями одних и тех же конструкций при увеличении количества элементов и частей делением их на большее число и варьированием места сопряжения установлено незначительное изменение податливостей (до 10^{-5} %), если отношение длины расчетного элемента к его высоте не менее 0,3. Это с большим запасом отвечает соотношению для элементов реальных конструкций и свидетельствует об устойчивости процесса вычислений к накоплению погрешности по разработанному методу.

Сравнение результатов, полученных по общей и избирательной методикам для стальных и железобетонных фундаментов, а также сопоставление их с данными теоретических исследований других авторов говорит о том, что принятые в избирательной методике допущения больше сказываются на поперечных податливостях в областях, граничащих с теми, где данные практически совпадают. Максимальные амплитуды колебаний, рассчитанные по избирательной методике, чаще завышены по сравнению с амплитудами, полученными по общей методике. Лучшее совпадение наблюдается при увеличении демпфирования, а также в случае приложения внешней нагрузки к элементам, удаленным от краев конструкции. Последнее объясняется вкладом осевых вибраций узлов, не учтенных избирательной методикой. По сравнению с общей она оценивается как приводящая к возможному 30 %-му расхождению максимальных значений амплитуд динамических податливостей в нормативном диапазоне частот.

Результаты расчетов сравнивались с имеющимися опубликованными данными натурных испытаний фундаментов (см. рис. 3), выполненных различными организациями в условиях электростанций. Можно отметить, что в ряде случаев расчетные области, имеющие максимальные амплитуды, практически совпадают с экспериментальными. В других случаях наблюдается смещение резонансов и отличие податливостей, однако, при условном совмещении кривых амплитуды податливостей отличаются незначительно. На отдельных участках кривых можно выделить области, где несоответствие результатов расчета и эксперимента весьма значительно. При этом расхождение расчетных и экспериментальных значений податливостей, как правило, не более, чем в 2 - 3 раза. Отличие меньше для ненагруженного турбоагрегатом фундамента, чем для нагруженного, что можно объяснить неучетом жесткостных

свойств статорных частей машин.

Причинами расхождения результатов являются: различия между характеристиками жесткости и демпфирования элементов, используемыми в расчетах и имеющими место для реальных объектов; недостатки схематизации и математических моделей объектов; изменение физико-механических характеристик во времени и в зависимости от значительных статических нагрузок и т.п. В целом можно считать, что расчеты по разработанным методикам удовлетворительно отражают динамические характеристики фундаментов, ненагруженных турбоагрегатом. Избирательные методики рекомендуются для оперативного определения вибрационных характеристик на стадии анализа конструктивных вариантов, а общая — для поверочных и уточняющих расчетов.

Оценено влияние податливости основания для нескольких фундаментов с целью сближения результатов расчета и эксперимента. Характеристики основания определялись из расчета колебаний балки — полосы на упругом основании и задавались по данным опубликованных экспериментальных исследований. Результаты свидетельствуют о незначительном влиянии этих факторов на динамические податливости верхнего строения в области рабочих оборотов и о неравномерности вибрационных перемещений нижних концов различных стоек. Влияние учета инерции поворота и деформации сдвига также незначительно в области частот, отвечающих группе основных резонансов типовых фундаментов со значительными динамическими податливостями. Для больших частот вне этой области, где уровень динамических податливостей ниже, чем на основных резонансах, влияние указанных факторов является более существенным, выражается в снижении резонансных частот и, как правило, в увеличении максимальных амплитуд. Для железобетонных конструкций со сравнительно короткими балками, а также для стальных фундаментов влияние инерции поворота и деформации сдвига является весьма значительным даже в области малых частот колебаний.

Выполнены исследования нескольких вариантов фундаментов с виброизоляцией, расположенной между верхним строением и стойками. Установлено, что введение виброизоляции существенно уменьшает уровень вибрационных перемещений, передаваемых на стойки и основание при вертикальных нагрузках. Для систем большой мощности указанный эффект в поперечном направлении не

достигается. Амплитуды колебаний точек верхней рамы фундамента для различных интервалов частот могут сохраняться или изменяться в зависимости от характеристик системы.

Исследованиями динамической податливости рамных фундаментов турбоагрегатов мощностью 50...1200 МВт установлено, что максимальные амплитуды точек системы обнаруживаются на разных частотах, а число максимумов может быть различным; вибрационные перемещения могут быть большими не под нагрузкой, а в соседних точках; от действия поперечной и вертикальной нагрузок могут развиваться интенсивные колебания в осевом направлении; с учетом и увеличением демпфирования ряд узкополосных резонансных всплесков вырождается в меньшее число широких резонансных областей.

6. Решение задач о колебаниях фундаментов избирательным методом. Для практического использования разработана методика автоматизированного дискретного рационального выбора параметров элементов сечений балок верхнего строения из нормированного набора их значений для достижения уровня вибраций в контрольных точках, отвечающих нормативным величинам в заданной области частот. Используется идея метода покоординатного спуска определения экстремума функционала. Система условно разделяется на части, каждая из которых имеет одну контрольную точку. Вариантный перебор элементов вначале осуществляется для той части, контрольная точка которой имеет максимальные значения податливости, и направлен на максимальное уменьшение уровня амплитуд. При достижении минимальной податливости в контрольной точке фиксируются значения параметров этой части и вариантный перебор идет затем для другой части, имеющей максимальную податливость в указанной точке. При варьировании параметрами элементов и определении части с максимальной податливостью расчеты выполняются для всей конструкции, фиксируются варианты, соответствующие нормативным значениям податливости, из них выбирается вариант, отвечающий рациональному объему материала. Решение задачи осуществляется за приемлемое для практического использования время ЭВМ. Как показал опыт, методика позволяет существенно сократить трудовые затраты при эскизном проектировании.

В связи со значительным разбросом модулей упругости и коэффициентов поглощения энергии элементов фундаментов разрабо-

тана методика вероятностной оценки нелинейных функций амплитуд и фаз вынужденных колебаний по числовым характеристикам случайных аргументов с использованием способа статистического моделирования. Одно испытание представляет собой численное определение вибрационных характеристик конструкции при фиксированных значениях модуля упругости и коэффициента поглощения, выбранных случайным образом в соответствии с законом распределения этих величин. При этом генерируется n случайных значений модуля упругости и n случайных значений коэффициента поглощения, отвечающих n элементам конструкции. Расчеты фундаментов показали, что плотность распределения случайных амплитуд существенно зависит от частоты колебаний и отличается от нормального закона при нормальном законе распределения исходных величин. Кривые математического ожидания динамической податливости практически совпадают в дорезонансной области частот с полученными в детерминированной постановке. В резонансных областях такие кривые отличаются сильнее, хотя смещение основных резонансов небольшое. По этим данным определяется вероятность того, что податливость не превышает нормативного значения, и оценивается надежность конструкции фундамента.

Разработан способ расчета нестационарных колебаний фундаментов при ступенчатом изменении внешней нагрузки P^{load} , что отвечает аномальным режимам работы турбоагрегата. Нагрузка описывается функцией Хевисайда $\sigma_0(t)$. На интервале $0 < t < 4T$ она заменяется обобщенной функцией $R(t)$, полученной наложением нескольких смещенных функций Хевисайда

$$R(t) = P [\sigma_0(t) - \sigma_0(t-T) - \sigma_0(t-2T) + \sigma_0(t-3T)] e^{i\omega t}$$

Период $4T$ обобщенной нагрузки выбирается так, чтобы при $t = 4nT$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$) перемещения и скорости точек системы обращались в нули. Начальные нулевые условия удовлетворяются выбором четверти периода разложения. Последний осуществляется так, чтобы переходный процесс за $t < T$ затухал. На участках $T < t < 2T$, $3T < t < 4T$ нагрузка отсутствует, что приводит систему с затуханием в состояние покоя с нулевыми значениями перемещения и скорости. Обобщенная нагрузка $R(t)$ периодически продлевается на всю числовую ось и представляется рядами Фурье. Задача сводится к оп-

ределению эквивалентной совокупности стационарных решений после спектрального изображения нагрузки. Предложенная методика обрабатывалась на элементах конструкции с использованием решения в замкнутой форме и применялась для анализа колебаний пространственных фундаментов с привлечением избирательного метода. Ее эффективность состоит в сравнительно небольших затратах времени ЭВМ и в возможности получения результата с любым шагом дискретизации в отличие от пошагового интегрирования. Исследования при внезапном приложении моногармонической нагрузки показали, что максимальные перемещения зависят от близости частоты возбуждения резонансной области. Если первая располагается в межрезонансной зоне, то максимальные перемещения от мгновенного приложения нагрузки могут быть в несколько раз большими по сравнению с величинами амплитуд стационарных колебаний. Отличие максимальных вибрационных перемещений и амплитуд стационарных колебаний небольшое, если частота возбуждающей нагрузки близка к резонансной. При возбуждении на резонансной частоте вибрационные перемещения не имеют выраженного максимума, а постепенно возрастают до амплитуд стационарных колебаний.

7. Поперечные колебания многоопорных роторов. Разработанный метод расчета колебаний рамных фундаментов развит для исследования многоопорных валопроводов, как составных частей системы ТФ. Валопровод моделируется стержневой системой с непрерывно распределенными параметрами и сосредоточенными включениями, отражающими влияние масляного слоя, опор, фундамента, дисков, сил парового потока. Они представляются упругодемпферными элементами, связанными в двух поперечных направлениях перекрестными коэффициентами. При необходимости учитывается связанность опор в продольном направлении. Валопровод, как и фундамент, условно разделяется на две подсистемы, а они — на части. Каждая состоит из участка постоянного сечения с размещенными с одной стороны сосредоточенными включениями. В остальном сущность метода расчета стационарных колебаний валопровода такая же, как и фундамента. Для учета инерции поворота и деформации сдвига сечений при изгибе используются аналитические функции, полученные по уравнениям С.П. Тимошенко.

Нестационарные линейные колебания валопроводов при аномальных режимах (внезапная разбалансировка, изменение нагруз-

ки) определяются двумя способами: численным интегрированием после разложения решения по собственным формам соответствующей консервативной системы; эквивалентной совокупностью стационарных перемещений после спектрального представления обобщенной функции нагружения рядами Фурье (как и для фундамента). Модель валопровода для решения как нестационарной, так и стационарной задачи одинакова. Исследования показали, что второй способ является более экономичным и целесообразным. Он не требует определения характеристик собственных колебаний и позволяет решать задачу с любым шагом дискретизации.

При расчетах роторов различной длины и жесткости, с разным числом участков и изменением места стыковки подсистем исследована устойчивость разработанного метода к накоплению погрешности расчета собственных частот, форм и амплитуд вынужденных стационарных колебаний. Установлено, что алгоритмы достаточно устойчивы в смысле накопления погрешности счета к увеличению числа участков и изменению места стыковки. Можно рассматривать роторы любой длины с большим числом участков, применяемых на практике, без накопления значительной вычислительной погрешности. Об этом свидетельствуют и результаты сопоставления данных, полученных по разработанному методу и по другим методикам (ЦКТИ, ХПИ, ЦИИ "Шкода"). По разработанному методу исследована устойчивость нескольких валопроводов на масляном слое подшипников (применялся алгоритм метода Д-разбиений), определены собственные и критические частоты, оценено влияние податливости опор и фундаментов на эти характеристики. Найдены АЧХ нескольких валопроводов турбоагрегатов с учетом инерции поворота и деформации сдвига элементов. Для валопроводов агрегатов мощностью 300 МВт (и меньшей) с рабочей частотой 50 Гц отмечено незначительное изменение АЧХ. Расчеты колебаний валопроводов мощностью 500 и 1000 МВт с рабочей частотой 25 Гц свидетельствуют о 5...7 %-ом изменении критических частот и амплитуд колебаний. Эти характеристики изменяются весьма значительно в области частот, больших 50 Гц.

Результаты определения критических частот валопроводов (по АЧХ) сравнивались с данными расчетов и натуральных испытаний, выполненных ЦИИ "Шкода" и НПО "Турбоатом". В целом результаты расчетов по уточненной методике лучше соответствуют данным натуральных испытаний, что позволило рекомендовать ее для прогнози-

рования вибрационных характеристик валопроводов.

В линейной постановке определялись переходные колебания валопроводов турбоагрегатов мощностью 300 и 500 МВт, вызванные внезапной разбалансировкой от обрыва части лопатки. Установлено, что развиваемые максимальные перемещения больше перемещений от такой же нагрузки в стационарном режиме в 1,5...4 и более раз. Уровень их зависит от близости частот возбуждения резонансным частотам, как и для фундаментов. Расчеты по двум предложенным методикам свидетельствуют об эффективности способа, основанного на спектральном представлении обобщенной внешней нагрузки и на решении эквивалентной совокупности задач стационарных вынужденных колебаний.

8. Взаимосвязанные колебания элементов системы турбоагрегат - фундамент. Разработанный метод расчета стационарных колебаний фундаментов и валопроводов как стержневых конструкций с распределенными параметрами и сосредоточенными включениями обобщен для расчета взаимосвязанных колебаний этих систем. Масляный слой и опоры учитываются упругодемпферными характеристиками, а статорные части машины - инерционными. Система условно разделяется на две подсистемы: левую и правую, а каждая из них на части, включающие участок фундамента, состоящий из поперечной рамы и продольных балок, с отнесенной к нему группой участков валопровода. Параметры каждой начальной части выражаются через такие же параметры конечной после определения рекуррентных соотношений между характеристиками на границах валопровода с учетом влияния фундамента. В остальном способ решения системы такой же, как и для фундамента с дополнительной продольной балкой.

Предложены модель и способ расчета фундамента, учитывающие жесткостные свойства корпусов цилиндров турбоагрегата, поскольку учет их инерционными характеристиками не приводит к достаточному соотношению результатов расчета и эксперимента в случае фундамента со статорными частями машины. Рамный фундамент представляется набором стержней, а упругоинерционные свойства статорных частей задаются коэффициентами динамических жесткостей, определенными расчетным или экспериментальным образом, связывающими опорные точки корпуса на фундаменте и точки установки вкладышей подшипников. На одном пролете фундамента выбираются 22 расчетные точки контакта корпуса и фундамен-

та, еще 2 точки на корпусе - в местах установки подшипников. Рассмотрен случай, когда колебания системы возбуждаются вертикальными силами, приложенными к двум указанным точкам на корпусе. Использована избирательная модель фундамента. Влияние корпуса сводится к силам, приложенным на фундаменте в точках контакта и зависящим от их перемещений. Последние принадлежат рассматриваемому и последующему участкам системы. Далее задача решается, как и для фундамента, но с учетом указанных особенностей, вносимых корпусом.

Метод расчета колебаний системы валопровод - фундамент применен для оценки влияния гибкости валопровода на характеристики фундамента на упругом основании турбоагрегата мощностью 1200 МВт с выносными опорами. Использована избирательная модель фундамента, рассмотрены плоские колебания валопровода при воздействии вертикальных нагрузок. Масляный слой и опоры учтены упругодемпферными характеристиками в вертикальной плоскости. Нижнее строение фундамента задано главными коэффициентами динамических жесткостей балки - полосы на упругом винклеровом основании в местах расположения стоек.

Результаты расчетов свидетельствуют о том, что учет гибкости валопровода существенно изменяет амплитуды колебаний фундамента в ряде точек по сравнению с учетом валопровода инерционными характеристиками (в 1,5...2 раза). Значения амплитуд колебаний фундамента увеличиваются для одних и уменьшаются для других точек расположения опор. Динамические усилия в опорах могут значительно отличаться от возмущающих сил, приложенных к цапфам роторов, и быть в 1,8 раза больше и в несколько раз меньше в зависимости от частоты возбуждения. Учет податливости фундаментной плиты и основания мало влияет на вибрационные перемещения верхнего строения фундамента, а самого фундамента - на амплитуды колебаний валопровода в области рабочей частоты.

Исследование вибрационных характеристик фундамента с корпусами цилиндров низкого давления (ЦНД) осуществлялось для турбоагрегата К-500-65/3000, имеющего четыре одинаковых ЦНД с расположенным между ними цилиндром высокого давления. Комплексные коэффициенты динамической жесткости ЦНД определялись по результатам опубликованных экспериментальных исследований, выполненных ЦКТИ и НПО "Турбоатом". Расчеты свидетельствуют о том, что резонансные частоты и амплитуды колебаний фундамента с корпуса-

ми ЦНД существенно отличаются от полученных без учета и с учетом корпусов инерционными характеристиками, а максимальный уровень вибрационных перемещений в несколько раз меньше, чем для фундамента без корпусов (рис. 4).

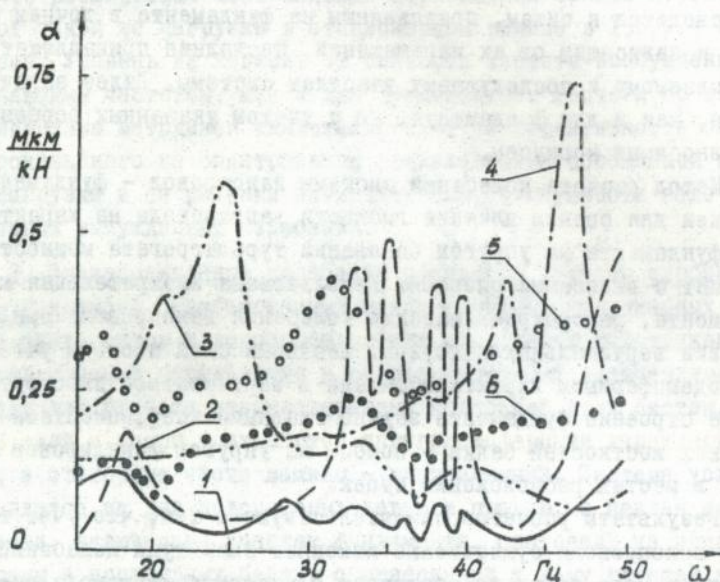


Рис. 4. Динамическая податливость:

- 1 - фундамента в системе статор - фундамент;
- 2 - опоры в системе статор - фундамент;
- 3 - фундамента с учетом статора в виде присоединенных масс;
- 4 - фундамента без учета статора;
- 5, 6 - границы области экспериментальных значений опор машин^{ж)}

ж) Динамические характеристики цилиндров низкого давления быстроходных турбин для ТЭС и АЭС / И.И. Орлов, В.В. Приходько, В.Г. Турапин и др. // Тр. Центр. котлотурбинного ин-та.- 1989.- Вып. 257.- С. 68 - 76.

На характеристиках фундамента появляются резонансные всплески, вызванные взаимодействием фундамента и корпусов. Они и те же характеристики отдельного фундамента и системы фундамент - корпус существенно отличаются друг от друга. Сравнение полученных результатов с опубликованными экспериментальными данными по динамической податливости опор, встроенных в од-

нотипные ЦНД различных машин, которые определены с помощью измерения на фальшкладше в условиях электростанции, свидетельствует об их соответствии (см. рис. 4).

9. Изгибные колебания тяжелых роторов с поперечной трещиной. Рассматриваются колебания полого абсолютно уравновешенного весоного ротора с распределенными параметрами на жестких опорах, вызванные малой поперечной трещиной. Она моделируется вырезом части вала в области растягивающих напряжений. Раскрытие и закрытие трещины описывается ступенчатой функцией. Уравнения изгибных колебаний ротора с переменной жесткостью во вращающейся системе координат приводятся с использованием разложения решения системы по собственным формам колебаний к системе с периодически изменяющимися коэффициентами и правыми частями одного периода. Из анализа уравнений следует, что колебания по данной форме от трещины практически не возбуждаются, если кривизна формы в месте ее образования близка либо равна нулю; существует спектр резонансных частот, отвечающий каждой из собственных частот ротора. Определение спектра вибрационных перемещений расчетной модели одного из роторов валопровода турбоагрегата осуществлено посредством использования метода гармонического баланса. Расчеты показали, что при малой трещине практический интерес представляет не только вторая, но и третья составляющая вибрационных перемещений, амплитуды которых могут быть соизмеримыми или отличаться в зависимости от положения трещины на валу и вибрационных характеристик системы.

Рассмотрен случай развитой трещины, занимающей значительную часть сечения ротора, но не превышающей его половину. Принимается, что упругая линия вала не имеет излома в месте образования трещины. Считается, что трещина, находящаяся в растянутой области, полностью раскрыта, а в сжатой — закрыта; раскрытие и закрытие трещины при переходе через границу областей описывается плавными функциями изменения моментов инерции сечения. Решение уравнений колебаний весоного ротора с переменными коэффициентами ищется в виде суммы перемещений от силы тяжести и от влияния трещины, а после использования разложения по собственным формам колебаний приводится к определению вибрационных перемещений от совместного воздействия этих факторов. В результате анализа полученной системы уравнений и

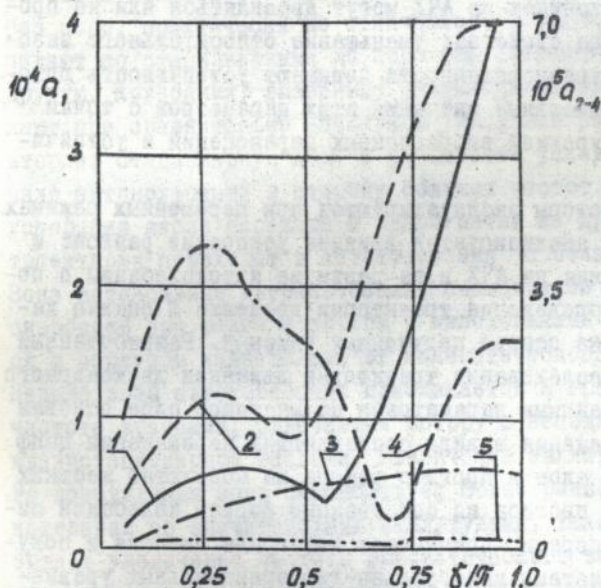
обоснованного ее упрощения используется интеграл Дюамеля, а решение представляется рядами Фурье.

Численный анализ первых пяти составляющих спектра вибрационных перемещений модели конкретного ротора показал, что соотношение между амплитудами гармоник существенно зависит от центрального угла ζ , образованного границами трещины при полном ее раскрытии. Если при малой трещине с ростом номеров гармоник их амплитуды уменьшаются, то при ее значительных размерах эта зависимость нарушается. Амплитуды всех гармоник растут в случае квазистатического увеличения площади под трещиной до 8...4-й части сечения вала. С дальнейшим ростом трещины амплитуды 3...5-й гармоник могут быть соизмеримыми с амплитудами 2-й и иметь относительные экстремумы. При этом существенно изменяются фазы гармоник. Максимальные амплитуды гармонических составляющих перемещений от трещины для сбалансированного ротора наблюдаются при значении частоты вращения, равной половине первой критической частоты.

Рассмотрены колебания весоного валопровода турбоагрегата на упругодемпферных опорах с остаточной неуравновешенностью и развитой "дышащей" поперечной трещиной. Модель валопровода принята такой же, как и при исследовании его стационарных и переходных колебаний. Считается, что амплитуда вынужденных колебаний вала в области трещины меньше его статического прогиба. Рассматривается прямая синхронная прецессия этого участка по эллиптической траектории. Продолжительность зон частичного и полного раскрытия и закрытия трещины зависит от величин статического и динамического перемещений, от положения и формы траектории. Решение уравнений колебаний весоного неуравновешенного валопровода с переменной жесткостью ищется в виде слагаемых перемещений: статической - от сил тяжести, стационарной вибрационной - от неуравновешенности, нестационарной - от совместного влияния всех факторов. Последняя определяется с помощью рядов Фурье из решения уравнений с правыми частями в форме полигармонической нагрузки, полученных из исходных зависимостей с учетом двух первых слагаемых. При этом использовались ранее разработанные методы расчета колебаний валопроводов.

Определены амплитуды и фазы пяти первых гармонических составляющих вибрационных перемещений валопровода турбоагрегата мощностью 300 МВт с трещиной в средней части ротора низкого

давления. Они существенно зависят от размера трещины и начального положения ее границ относительно осей траектории вынужденных колебаний (относительно вектора неуравновешенности), от амплитуды вынужденных колебаний (величины вектора неуравновешенности) и от места регистрации характеристик колебаний по отношению к месту образования трещины, от положения и разности величин осей траектории вынужденных колебаний. Общей закономерностью является резкий рост амплитуд гармоник при увеличении площади трещины до 8...4-й части исходного сечения вала (рис. 5). При этом амплитуды 2...4-й гармоник соизмеримы между



собой, первой - значительно больше, а пятой - меньше их. В одних случаях максимумы амплитуд гармоник наблюдаются, если площадь сечения под трещиной равна восьмой, в других - четвертой части сечения вала. Максимальные значения амплитуд гармоник вибрационных перемещений не превосходят 1...2 мкм.

Рис. 5. Амплитуды a_n гармоник вибрационных перемещений валопровода, отнесенные к ширине трещины, для одного из расчетных вариантов:

1...5 - номера гармоник;

δ - центральный угол, образованный границами трещины

10. Колебания высокооборотных роторов малогабаритных турбомашин на подшипниках скольжения. Рассматриваются колеба-

ния статически малонагруженных высокооборотных роторов на цилиндрических подшипниках, совершающих экспериментально наблюдаемые круговые прецессионные движения вследствие превышения сил остаточной неуравновешенности над силами тяжести. При потере устойчивости на них накладывается движение, вызванное автоколебательными явлениями в системе ротор - масляный слой. Изучается движение гибких роторов, используются существенно нелинейные зависимости поддерживающих сил масляного слоя коротких цилиндрических подшипников при ламинарном режиме течения смазки. Анализ стационарных колебаний и устойчивости при малых возмущениях симметричного однодискового ротора свидетельствует о том, что в зависимости от соотношения неуравновешенности ротора и зазора в подшипниках на АЧХ могут проявляться или не проявляться резонансные свойства; уменьшение относительного зазора и увеличение неуравновешенности повышают устойчивость ротора; существуют оптимальные значения этих параметров с точки зрения допустимых уровней вибрационных перемещений и устойчивости движения.

Исследуемые роторы эксплуатируются при переменных режимах вращения. В работе анализируется влияние ускорения разгона и вибрации основания на АЧХ и на развитие автоколебаний с помощью численного определения траектории движения и оценки характера колебаний на основе полученных решений. Разработанный метод расчетного исследования траектории движения двухопорного ротора с распределенными параметрами на масляном слое основан на представлении решения в виде составляющих перемещения цапф ротора на масляном слое и прогиба ротора на абсолютно жестких опорах; разложении прогиба по собственным формам колебаний системы с жесткими опорами; применении интеграла Дуамеля и получении нелинейной системы интегрально-дифференциальных уравнений с использованием условий в местах опирания ротора; замене этой системы эквивалентными дифференциальными зависимостями; использовании алгоритма многошагового прогноза с коррекцией для численного интегрирования полученной системы дифференциальных уравнений относительно координат положения и скорости цапф ротора в подшипниках. Численный анализ выполнен для двух роторов - симметричного одномассового и с распределенными параметрами - при малой неуравновешенности, отвечающей безрезонансной АЧХ, и большей - соответствующей резонансной характе-

ристике жесткого типа.

Для роторов с меньшей относительной неуравновешенностью получено: нестационарные АЧХ совпадают в областях устойчивости со стационарными; начало областей самовозбуждающихся вибраций и развитых интенсивных автоколебаний с увеличением ускорения разгона смещается в сторону больших частот; с учетом силы тяжести указанное смещение областей автоколебаний является незначительным; при вибрациях опор увеличение ускорения практически не сдвигает вправо начало зоны автоколебаний; нарушение симметрии системы смещением неуравновешенной нагрузки приводит к более раннему развитию автоколебаний.

Траектории ротора с большей относительной неуравновешенностью в области резонанса, полученные с учетом сил тяжести и без него, практически не отличаются, а нестационарные АЧХ совпадают со стационарными до перехода системы с одной ветви на другую. Колебания, вызванные указанным переходом, быстро затухают при сравнительно небольшом ускорении разгона. Система повторяет стационарную АЧХ, а увеличение ускорения сдвигает начало автоколебаний в сторону больших частот. При значительном ускорении после перехода с одной ветви на другую осцилляции траектории переходят в автоколебания с большими амплитудами. Зона интенсивных автоколебаний, смещающаяся в область больших скоростей при разгоне ротора с неподвижными опорами, сдвигается в обратном направлении от кинематического возбуждения опор. Начало зоны автоколебаний приближается к граничной устойчивой частоте вращения, отвечающей ротору с неподвижными опорами при квазистационарном разгоне. Увеличение амплитуды кинематического возбуждения опор способствует более раннему развитию автоколебаний со значительными амплитудами. Такое же влияние оказывает увеличение частоты кинематического возбуждения в областях частот, меньших парциальной частоты ротора на жестких неподвижных опорах. Дальнейшее увеличение частоты вибраций опор за указанной парциальной частотой приводит к уменьшению амплитуд осцилляций траектории, а развитие больших автоколебаний наблюдается при этом на значительных частотах вращения.

Полученные результаты позволили объяснить изменения в траекториях, экспериментально наблюдаемых при переходных режимах работы малонагруженных роторов турбокомпрессоров на масляном слое.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Развита математические модели конструкций системы ТФО и разработан комплекс методов расчета:

стационарных колебаний пространственных стержневых фундаментов и валопроводов турбоагрегатов с распределенными параметрами, учитывающий их взаимное влияние и заключающийся в выделении базовых частей моделей и последовательном решении систем уравнений движения для каждой из частей с применением рекуррентных условий связи параметров на их границах;

колебаний фундаментов и валопроводов, учитывающий деформацию сдвига и инерцию поворота при изгибе стержней, а также условия сопряжения элементов, которые должны отвечать сочленению их краев по высоте;

вибрационных характеристик верхнего строения симметричных конструкций фундаментов с вертикальными и поперечными внешними нагрузками, имеющий целью многовариантное проектирование по избирательным моделям, рассматривающим те виды деформации элементов, которые вносят наибольший вклад в определяемые характеристики;

рационального автоматизированного выбора параметров элементов рамных фундаментов по критерию допустимого или минимального уровня вибрационных перемещений в контрольных точках;

вероятностной оценки вибрационных характеристик фундаментов при случайных значениях модуля упругости и коэффициента поглощения энергии элементов;

переходных колебаний рамных фундаментов и валопроводов турбоагрегатов, использующий спектральное представление обобщенной функции нагружения рядами Фурье и эквивалентную совокупность стационарных решений;

колебаний рамных фундаментов, учитывающий упругоинерционные свойства корпусов цилиндров турбоагрегата со встроеными опорами, задаваемые коэффициентами динамических жесткостей, которые получены по результатам расчетных или экспериментальных исследований.

2. Разработан метод расчета спектра вибрационных перемещений валопровода турбоагрегата, вызванных "дышащей" поперечной трещиной, задаваемой вырезом вала в области растяжения. Задача сведена к определению колебаний при эквивалентной полигармонической нагрузке с использованием прогиба от сил тяжести

и вибрационных перемещений от неуравновешенности.

3. Предложен метод расчета переходных колебаний высокооборотных малонагруженных двухопорных роторов турбомашин, моделируемых стержневой системой с распределенными параметрами и сосредоточенными неуравновешенностями, с заданными в аналитическом виде нелинейными характеристиками подшипников скольжения. Метод развит для учета вибраций опор и сводит нестационарную задачу к численному решению системы нелинейных интегрально-дифференциальных уравнений и оценке характера колебаний по траекториям движения ротора.

4. Выявлены особенности вибрационных характеристик ряда фундаментов и влияние на них податливости основания и виброизоляции, инерции поворота и деформации сдвига, случайного разброса модуля упругости и коэффициента поглощения энергии элементов, упругости валопровода и корпусов цилиндров турбоагрегата, внезапности приложения внешней нагрузки.

5. Оценено влияние инерции поворота и деформации сдвига элементов, податливости фундамента, внезапности приложения нагрузки и наличия поперечной трещины на вибрационные характеристики нескольких валопроводов. Выявлено, как сказывается величина дисбаланса и положение его по оои вала, ускорения разгона и выбега, амплитуда и частота гармонической вибрации опор на АЧХ и на развитие автоколебаний малонагруженных роторов с цилиндрическими подшипниками скольжения.

6. Результаты работы использованы на практике для оценки вибрационных характеристик конструкций системы ТФ и решения задач повышения их вибрационной прочности.

Наиболее важными работами, отражающими основное содержание и полученные результаты исследований по теме диссертации, являются:

а) монографии (в скобках указаны главы, лично написанные диссертантом):

1. Воробьев Ю.С., Шульженко Н.Г. Исследование колебаний систем элементов турбоагрегатов (гл. III, IV). - Киев : Наук. думка, 1978. - 135 с.

2. Шульженко Н.Г., Воробьев Ю.С. Численный анализ колебаний системы турбоагрегат - фундамент (гл. II - IX). - Киев : Наук. думка, 1991. - 232 с.;

б) методические рекомендации:

3. Расчеты и испытания на прочность. Метод расчета на вынужденные колебания пространственных стержневых конструкций (типа фундамент - основание агрегатов) // МР 129-84.- М.: Всесоюз. НИИ нормализации машиностроения, 1984.- 55 с.

4. Расчеты и испытания на прочность. Методы и алгоритмы расчета на ЭВМ свободных и вынужденных колебаний многопролетных роторов на упругодемпферных опорах // МР 220-87.- М.: Всесоюз. НИИ нормализации машиностроения, 1987.- 61 с.;

в) статьи и тезисы докладов:

5. Филиппов А.П., Шульженко Н.Г. Устойчивость колебаний ненагруженного неуравновешенного ротора в коротких опорах жидкостного трения // Машиноведение.- 1973.- № 4.- С. 21 - 27.

6. Филиппов А.П., Шульженко Н.Г. О нестационарных колебаниях ротора в подшипниках скольжения // Теорет. и прикл. механика.- 1974.- Вып. 5.- С. 101 - 106.

7. Филиппов А.П., Воробьев Ю.С., Шульженко Н.Г. Исследование колебаний в системе турбоагрегат - фундамент - основание // Тр. координац. совещ. по гидротехнике.- 1976.- Вып. 109.- С. 123 - 128.

8. Филиппов А.П., Шульженко Н.Г., Павлюк Н.И. Метод расчета собственных частот вертикальных колебаний пространственных рамных фундаментов турбоагрегатов по частям // Там же.- С. 128 - 131.

9. Билетченко В.П., Романенко Л.Г., Шульженко Н.Г. Исследование вынужденных колебаний однопролетных участков системы турбоагрегат - фундамент - основание // Там же.- С. 131 - 135.

10. Шульженко Н.Г., Дзюба В.Ф. Вынужденные колебания однопролетных участков системы турбоагрегат - фундамент - основание с упруго-опертым ригелем // Пробл. машиностроения.- 1976.- Вып. 3.- С. 44 - 50.

11. Шульженко Н.Г. Метод расчета колебаний пространственных рамных фундаментов под турбоагрегаты // Там же.- 1978.- Вып. 6.- С. 23 - 28.

12. Шульженко Н.Г. Об одной модификации методов начальных параметров и динамических жесткостей при расчете поперечных колебаний валов // Там же.- Вып. 7.- С. 51 - 55.

13. Филиппов А.П., Шульженко Н.Г., Билетченко В.П. Колебания рамных фундаментов мощных турбоагрегатов // Строит. меха-

ника и расчет сооружений.- 1978.- № 1.- С. 34 - 38.

14. Шульженко Н.Г., Дзюба В.Ф. Расчет вынужденных колебаний пространственных конструкций рамных фундаментов с виброизоляцией под мощные турбоагрегаты // Динамика пространственных конструкций.- Киев : Киев. инж.-строит. ин-т.- 1978.- С. 142 - 145.

15. Шульженко Н.Г., Жулай С.В. Вынужденные стационарные колебания многоопорных валопроводов турбоагрегатов // Пробл. машиностроения.- 1980.- Вып. 10.- С. 23 - 28.

16. Билетченко В.П., Дзюба В.Ф., Шульженко Н.Г. Два алгоритма расчета стационарных колебаний рамных фундаментов под мощные турбоагрегаты // Динамика оснований, фундаментов и подзем. сооружений : Материалы У Всесоюз. конф.- М.: НИИОСП, 1981.- С. 18 - 20.

17. Билетченко В.П., Шульженко Н.Г. Об учете основания при определении виброперемещений элементов системы турбоагрегат - фундамент - основание // Там же.- С. 21 - 23.

18. Шульженко Н.Г. Теоретические исследования вибрации крупных турбоагрегатов // Проблемы вибрации турбоагрегатов ТЭС и АЭС : Тез. докл. Всесоюз. совещ.- М.: Союзтехэнерго, 1982.- С. 23 - 25.

19. Шульженко Н.Г., Дзюба В.Ф. Колебания рамных фундаментов турбоагрегатов с виброизоляцией // Строит. механика и расчет сооружений.- 1982.- № 6.- С. 56 - 59.

20. Жулай С.В., Шульженко Н.Г. Поперечные нестационарные колебания валопроводов при вылете турбинной лопатки // Повышение надежности энергетических сооружений при динамических воздействиях.- Л.: Энергоатомиздат, 1982.- С. 205 - 208.

21. Шульженко Н.Г., Билетченко В.П., Дзюба В.Ф. Методики и результаты расчета стационарных колебаний в системе турбоагрегат - фундамент - основание мощных энергоблоков // Там же.- С. 237 - 239.

22. Шульженко Н.Г., Ганжа А.М. Устойчивость движения многоопорных валопроводов турбоагрегатов при малых поперечных возмущениях // Пробл. машиностроения.- 1983.- Вып. 19.- С. 16 - 18.

23. Шульженко Н.Г., Билетченко В.П. Вертикальные колебания фундамента, возбуждаемые ротором турбоагрегата // Строит. механика и расчет сооружений.- 1984.- № 6.- С. 55 - 57.

24. Шульженко Н.Г. К учету инерции поворота и перерезывающих сил при исследовании стационарных колебаний стержневых конструкций // Пробл. машиностроения.- 1985.- Вып. 23.- С.3-6.

25. Методические рекомендации по расчету вынужденных колебаний пространственных стержневых конструкций и опыт их использования в проектировании фундаментов турбоагрегатов / Н.Г. Шульженко, В.П. Билетченко, В.Ф. Дзюба, Е.Г. Бабский // Стандартизация методов расчета и испытаний на колебания и устойчивость.- М.: Изд-во стандартов, 1985.- С. 13 - 23.

26. Шульженко Н.Г. Определение признака появления трещины при изгибных колебаниях весоного ротора // Пробл. машиностроения.- 1987.- Вып. 27.- С. 24 - 29.

27. Шульженко Н.Г. К определению характерных вибропризнаков весоного ротора с поперечной трещиной // Повышение вибрационной надежности паротурбинных агрегатов ТЭС и АЭС : Тез. докл. Всесоюз. совещ.- М.: ВТИ, 1988.- С. 53 - 54.

28. Шульженко Н.Г. Учет упругоинерционных свойств статорных частей агрегата при определении динамических характеристик фундамента // Пробл. машиностроения.- 1989.- Вып. 31.- С. 40 - 43.

29. Шульженко Н.Г., Дзюба В.Ф. Влияние инерции поворота и деформации сдвига на динамические характеристики пространственных стержневых конструкций // Там же.- 1989.- Вып. 32.- С. 4-8.

30. Шульженко Н.Г., Ганжа А.М. Влияние инерции поворота и деформации сдвига на динамические характеристики валопроводов при изгибных колебаниях // Динамика и прочность машин.- 1989.- Вып. 49.- С. 88 - 91.

31. Шульженко Н.Г. Нестационарные и самовозбуждающиеся колебания ненагруженного неуравновешенного гибкого ротора в подшипниках скольжения // Машиноведение.- 1989.- № 4.- С.85-90.

32. Шульженко Н.Г. Исследование влияния виброизоляции на динамические характеристики фундаментов турбоагрегатов // Проблемы виброизоляции машин и приборов : Тез. докл. Всесоюз. конф.- Иркутск - М.: ИМАШ АН СССР, 1989.- С. 166 - 167.

33. Воробьев Ю.С., Шульженко Н.Г. Основные направления теоретических исследований динамики системы турбоагрегат - фундамент - основание, выполненных в ИПМаш АН УССР // Повышение надежности энергетических сооружений при динамических воздействиях.- Л.: Энергоатомиздат, 1989.- С. 190 - 192.

34. Билетченко В.П., Шульженко Н.Г. Динамические характеристики фундамента турбоагрегата со случайными параметрами жесткости и демпфирования // Там же.- С. 200 - 202.
35. Shulzhenko N.G., Biletchenko V.P. The numerical analysis of vibrations of large turbogenerators foundations // Dynamics of Structures - 89.- Plzen : SKODA, 1989.- P. 105 - 108.
36. Шульженко Н.Г. Определение признака развитой поперечной трещины при изгибных колебаниях весомого ротора // Пробл. машиностроения.- 1990.- Вып. 34.- С. 7 - 13.
37. Шульженко Н.Г., Андреев Г.А. Вынужденные стационарные колебания ненагруженного ротора на нелинейных гидродинамических опорах // Динамика и прочность машин.- 1990.- Вып. 51.- С.33-37.
38. Шульженко Н.Г. Нелинейные колебания малонагруженного ротора на подшипниках скольжения при переходных режимах // Нелинейные колебания механических систем : Тез. докл. II Всесоюз. конф.- Горький : НТО Машпром, 1990.- С. 222 - 223.
39. Шульженко Н.Г. Влияние кинематического возбуждения на переходные колебания малонагруженного высокооборотного неуравновешенного ротора на подшипниках скольжения // XXIII Всесоюз. науч. совещание по проблемам прочности двигателей : Тез. докл. М.: ЦИАМ, 1990.- С. 153 - 154.
40. Шульженко Н.Г., Билетченко В.П. Расчет вибрационных характеристик фундамента с учетом упругоинерционных свойств корпусов цилиндров турбоагрегата; ин-т пробл. машиностр. АН УССР.- Харьков, 1991.- 14 с., Деп. в ВИНТИ 20.08.91 №3516-В91.
41. Шульженко Н.Г., Билетченко В.П. Переходные колебания пространственной стержневой конструкции при внезапном нагружении // Пробл. машиностроения и надежности машин.- 1991.- № 1.- С. 27 - 32.
42. Шульженко Н.Г. Переходные колебания малонагруженного высокооборотного ротора на подвижных опорах жидкостного трения // Там же.- № 5.- С. 25 - 30.
43. Шульженко Н.Г. Математическое моделирование колебаний ротора с поперечной трещиной // Надежность машин, математическое и машинное моделирование задач динамики.- Моделирование-91 : Тез. докл. Всесоюз. конф.- Кишинев : АН ССР Молдова, 1991.- С. 88 - 89.
44. Чернов Н.Д., Шульженко Н.Г., Ганжа А.М. Определение

динамических характеристик роторов по уточненной теории изгиба // Тяжелое машиностроение.- 1991.- № 2.- С. 10 - 12.

45. Шульженко Н.Г., Билетченко В.П. Расчет переходных поперечных колебаний валопровода турбоагрегата // Пробл. машиностроения и надежности машин.- 1992.- № 3.- С. 34 - 39.

Ав 26.232

Шульженко

Отв. за выпуск к.т.н. Билетченко В.П.

Подписано к печати 02.II.92 г.

Бумага типографская № 1. Формат 60 x 90 1/16.

Усл. печ. л. 2,25. Учетн. изд. л. 2

Заказ № 2322. Тираж 100 экз.

Ротапринт ИПМаш АН Украины,
310046, г. Харьков, ул. Дм. Пожарского, № 2/10.