

01.02.06

Р 693

Государственный комитет СССР по народному образованию
Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

1 Романов

На правах рукописи

РОМАНОВ ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 534.2.232

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Специальность 01.02.06 -

"Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Челябинск

1930

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена на кафедре "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Гохфельд Д.А.

Официальные спонсоры:
доктор технических наук,
профессор Гринёв В.Б.,
кандидат технических наук,
доцент Бломенкранц Д.Л.

Ведущее предприятие - Институт проблем прочности АН УССР.

Занятие состоится 25 апреля 1990 г., в 10 часов,
на заседании специализированного совета Д 053.13.01 при
Челябинском политехническом институте имени Ленинского
комсомола (454060, г. Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Челябинского политехнического института.

Автореферат разослан 22 марта 1990 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

М.И. Коновалов

В.М. Коновалов

Актуальность темы. В решении комплекса задач повышения долговечности и надёжности современной машиностроительной продукции важное место отводится разработке методов и средств проведения усталостных испытаний. Всё более широкое распространение получают усталостные испытания при высоких частотах нагружения. Настоятельная необходимость в таких испытаниях проявляется с одной стороны - реальными условиями эксплуатации некоторых видов техники, для которых высокочастотные колебания являются либо неизбежным фоном (как, например, для лопаток турбин и компрессоров, участков обшивки летательных аппаратов), либо основой рабочего режима (например, разнообразное ультразвуковое оборудование технологического, медицинского, гидролокационного назначения), и с другой стороны - поиском достоверных методов ускоренных усталостных испытаний. Возможности исследования усталостной прочности материалов при высоких звуковых и ультразвуковых частотах нагружения во многом определяются наличием соответствующего испытательного оборудования и его техническим совершенством.

В настоящее время в установках для высокочастотных усталостных испытаний используется принцип преобразования электрической энергии в энергию механических колебаний, в частности, с помощью магнитострикционных преобразователей (МСП). Основной опыт эксплуатации МСП связан с техникой мощного ультразвука технологического и гидролокационного назначения. Магнитострикционные испытательные установки (МИУ) в нашей стране серийно промышленностью не выпускаются, а те, на которых получен практически весь объём имеющегося экспериментального материала в области высокочастотной усталости, являются результатом единичных разработок, созданных в лабораториях усталостной прочности некоторых институтов (ИПП АН УССР, ЦНИИЖелезобетон, МАИ, ЧИИ и др.) и постоянно доводимых самими пользователями.

По конструктивному решению наиболее близки к существующим МИУ технологические установки ультразвуковой сварки, ультразвукового резания и т.п., состоящие из преобразователя, концентратора (или концентраторов) механических колебаний и инструмента. Однако при внешнем сходстве конструкций обеспечение работоспособности МИУ представляет существенно более сложную задачу. Основная причина этого связана с различием в требованиях к амплитудам колебаний: если технологические установки работают, как правило, в одном амплитудном режиме, то для построения кривой усталости только

одного материала необходимо проведение испытаний на разных амплитудах, отличающихся более чем в два с половиной раза. Переход с одного уровня амплитуд испытаний на другой сопровождается непропорциональным изменением нагрузки на преобразователь. В этих условиях использование общепринятых линеаризованных подходов к описаниею состояния МСЛ, являющегося существенно нелинейной колебательной системой, оказывается недопустимым. Необходим более глубокий анализ амплитудных соотношений для колебательных режимов системы преобразователь - объект испытаний.

Совершенствование МИУ идёт по пути создания вибростендов, позволяющих испытывать образцы из различных материалов (или детали, в значительной степени отличающиеся своими динамическими характеристиками) и снижения мощности необходимого источника электрической энергии. Строгая математическая постановка и решение этих задач возможны лишь с использованием модели, устанавливающей соответствие между амплитудными значениями колебательных параметров на электрическом "входе" и механическом "выходе" с учётом следующих принципиальных особенностей рассматриваемой колебательной системы: 1) связности трёх физических ступеней магнитострикционной установки (электрической, магнитной, механической), обусловленной последовательным преобразованием электрической энергии в магнитную и магнитной в механическую; это делает необходимым описание совместных установившихся колебательных режимов каждой ступени; 2) нелинейности магнитной ступени (магнитного и магнитострикционного поведения), являющейся причиной существенно нелинейной связи между электрическим "входом" и механическим "выходом"; 3) необходимости обеспечения работы в широком диапазоне колебательных режимов.

Модели, позволяющей учесть все эти качества в комплексе, до настоящей работы не существовало. В результате отсутствуют и обоснованные методики проектирования МИУ. Это сдерживает более широкое внедрение высокочастотных усталостных испытаний в практику.

Работа выполнена в соответствии с Программой стандартизации по надёжности, прочности и износстойкости на 1981-85 г.г. и на период до 1990 г. № 450 - I.09.05 Госстандарта СССР.

Цель работы является совершенствование МИУ (обеспечение возможности проведения на одной установке испытаний максимального числа материалов или натурных деталей, в значительной степени отличающихся своими динамическими характеристиками, и снижение

мощности необходимого электрического источника высокочастотной энергии) на основе предлагаемой математической модели связанной нелинейной электро-магнито-механической колебательной системы.

Научную новизну диссертационной работы составляют:

- разработка и экспериментальная проверка математической модели связанной нелинейной электро-магнито-механической колебательной системы магнитострикционной установки для усталостных испытаний;
- формулировка выбора режима работы магнитострикционного преобразователя как задачи нелинейной оптимизации по предложенному обобщённому энергетическому критерию и решение последней;
- обоснование эффективности использования сердечника магнитострикционного преобразователя в форме стержня, равнопрочного при колебаниях по первой собственной форме;
- предложенная нелинейная электрическая схема замещения магнитострикционного преобразователя и аналитическое решение задачи согласования электрического источника питания с магнитострикционной установкой.

Практическая ценность диссертации заключается в разработке методики проектирования МИУ для усталостных испытаний образцов при симметричных циклах растяжения-скатия, основанной на совместном решении задач оптимизации параметров режима работы преобразователя и параметров механической части и обеспечивающей для заданной совокупности объектов испытаний наименьшую мощность необходимого источника высокочастотной электрической энергии, а также методики проектирования МИУ для испытаний натурных деталей (типа лопаток колёс турбин и компрессоров), обладающей нетрадиционным для высокочастотной резонансной системы свойством широкого диапазона рабочих частот. Результаты, полученные в диссертационной работе, могут быть использованы при создании новых, совершенствовании и диагностике имеющихся МИУ предприятиями и организациями, проводящими высокочастотные усталостные испытания. Предложенная модель стержневого МСЛ может быть использована также при создании и совершенствовании магнитострикционного оборудования технологического, медицинского и гидролокационного назначения.

Внедрение. По результатам работы Госкомитетом СССР по стандартам изданы Методические рекомендации "Метод расчёта магнитострикционных вибростендов для усталостных испытаний" МР 167-85. Методика проектирования установок для испытаний натурных деталей и испытательная установка внедрены в СКБ "Турбина" (г.Челябинск).

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, определяется:

- применением современных методов теории колебаний, нелинейных электрических цепей, физики ферромагнетиков, вычислительной математики;
- обоснованностью принятых допущений при моделировании установившихся колебательных режимов каждой ступени связанной нелинейной электро-магнито-механической колебательной системы;
- результатами экспериментальной проверки предложенной в диссертации математической модели и работоспособности испытательных установок, созданных на основании разработанных методик проектирования.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Второй Всесоюзной школе молодых учёных и специалистов "Проблемы оптимизации в машиностроении" (г. Алушта, май 1986 г.), на XXII Всесоюзном научном совещании по проблемам прочности двигателей (г. Москва, ИМ АН СССР, апрель 1988 г.), на Всесоюзной конференции "Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения" (г. Киев, ИПП АН УССР, декабрь 1988 г.), на совместном научном семинаре отделов "Прочность материалов при высокочастотном нагружении и воздействии газовых потоков" и "Вибрационной надёжности" ИПП АН УССР (февраль 1989 г.), на ежегодных научно-технических конференциях Челябинского политехнического института в 1985-86 г.г. и научных семинарах кафедры "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" ЧПИ.

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в девяти опубликованных статьях и тезисах докладов.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, перечня основных результатов и выводов, списка использованных литературных источников из 180 наименований на русском и иностранных языках и приложения. Работа содержит 143 страницы основного машинописного текста, 56 иллюстраций на 32 страницах и 4 таблицы.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ РАСЧЁТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Для анализа современных подходов к расчёту и проектированию испытательных установок, а также оборудования технологического и гидролокационного назначения, использующих в качестве возбудителя высокочастотных механических колебаний магнитострикционные преобразователи, рассмотрены работы как советских, так и зарубежных учёных. Исследование существующих способов описания установившихся колебательных режимов МСИ выполнено по работам Л.Я.Гуттина, А.А.Харкевича, В.Н.Барке, М.Г.Когана, И.П.Голяминой, Г.М.Свердлина, Kikuchi J., Woollett R., Simizu J., Neppiras E.A., Whymark R.R. Обзор подходов к проектированию механической части сделан по работам Л.Г.Меркулова, А.И.Маркова, И.И.Теумина, Б.Х.Мечетнера, З.И.Полякова, Д.Л.Благинкранца, В.Ф.Казанцева, Л.О.Макарова, С.И.Богомолова, Э.А.Симсона, И.А.Сазонова, Eisner E., Mason W. и других авторов. Отмечено, что в разработке схем испытательных установок, в решении вопросов теории и практики проведения высокочастотных испытаний, систематизация результатов экспериментальных работ значительная роль принадлежит коллективу сотрудников Института проблем прочности АН УССР, ведущему многолетнюю плодотворную работу по развитию этого относительно молодого направления в проблеме усталостной прочности.

В результате выполненного анализа сделан вывод, что эффективное использование МСИ, представляющего собой связанную электро-магнито-механическую колебательную систему, в значительной степени зависит от согласования его с нагрузкой и целого ряда особенностей эксплуатации. Это делает целесообразным единый подход к проектированию всей установки в целом. Основными этапами реализации такого подхода должны являться: 1) оценка величины сопротивления полезной нагрузки и диапазона её изменения в процессе работы; 2) оценка величины потерь энергии в МСИ, механическом концентраторе, системе охлаждения, опорах; 3) оценка располагаемой удельной (на единицу выходной площади) мощности МСИ на основании выбора магнитострикционного материала, режима его перемагничивания и механического деформирования, конструктивного типа (стержневой с замкнутым или разомкнутым магнитопроводом, цилиндрический и т.п.); 4) расчёт геометрических размеров МСИ из условий энергетического и конструктивного согласования с механической нагрузкой; 5) согласование электрической и магнитной частей установки.

В силу связности системы каждая из этих подзадач самостоятельна лишь относительно, так как использует в качестве исходных (входных) совместные параметры. Естественно, что в этих условиях качественные характеристики проектируемой системы в полной мере зависят от решения каждой из них. Это обуславливает целесообразность использования при проектировании МПУ единой модели, ориентированной на поиск оптимальных решений, то есть достоверной в достаточно широкой области изменения параметров. Показано, что сложность создания такой математической модели применительно к магнитострикционному преобразователю заключается в сочетании многопараметричности и нелинейности магнитострикционного эффекта.

На сегодняшний день распространены упрощённые подходы, использующие линейное или квазилинейное представление о колебаниях электромеханически активных материалов (в последнем случае параметры состояния предполагаются связанными линейными уравнениями, а коэффициенты уравнений, то есть характеристики материала, зависящими от амплитуды), реализуемые в эквивалентных схемах замещения. Качественно отражая основные особенности поведения МСИ, такие модели непригодны для количественного решения задач оптимального проектирования и, в первую очередь, для центральной задачи - выбора режима работы преобразователя (поля подмагничивания, переменной составляющей параметра на магнитной стороне, переменной составляющей параметра на механической стороне) и оценки его энергетических характеристик (удельной отдаваемой в нагрузку энергии и коэффициента полезного действия).

В то же время, моделирование нелинейных свойств магнитных элементов широко используется в расчётах нелинейных электрических цепей. Распространение таких подходов на магнитострикционные материалы требует введения в характеристику намагничивания члена, учитывающего магнитоупругое взаимодействие. Моделей такого рода в литературе не найдено. На основании выполненного обзора конкретизированы задачи, решение которых необходимо для достижения основной цели настоящей работы.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЕЁ АДЕКВАТНОСТИ

Магнитострикционная установка рассматривается как связанная нелинейная электро-магнито-механическая система, полное описание которой включает установленные колебательные режимы трёх её

ступеней: электрической (физические параметры - ток J и напряжение U), магнитной (напряженность магнитного поля H и магнитная индукция B), механической (виброскорость ω и механические напряжения σ). Электрическая часть установки может работать как в квазистатическом, так и в резонансном режимах и рассматривается как нелинейная система с сосредоточенными параметрами. Колебания на магнитной ступени для установленного режима работы полагаются квазистатическими. Для этой ступени характерна нелинейная связь между напряжённостью магнитного поля и магнитной индукцией в сочетании с особенностями магнитного поведения, обусловленной наличием выраженного магнитоупругого эффекта. Механическая ступень принята линейной с расщеплёнными параметрами.

Связь между ступенями является отражением двух последовательных процессов преобразования: электрической энергии в магнитную и магнитной в механическую. Первое преобразование описывается законом электромагнитной индукции и законом полного тока. Параметром согласования колебательных режимов на электрической и магнитной ступенях является число витков обмотки сердечника. В результате второго преобразования на механической стороне устанавливаются такие амплитуды колебаний, при которых энергия, рассеиваемая на механической стороне, равна работе сил магнитострикции. Математическая формулировка этого условия с учётом зависимости магнитострикционных и магнитных свойств от магнитного и механического состояния материала

$$H = f(B, \sigma), \quad \epsilon_m = f(B, \sigma) \quad (I)$$

(ϵ_m - деформация магнитострикции) представляет связь между параметрами магнитной и механической ступеней. Согласование магнитного и механического колебательных режимов достигается за счёт выбора площади поперечного сечения преобразователя. Аналитические аппроксимации (I) являются основой математической модели МСИ. Их соответствие реальному поведению магнитострикционного материала определяет достоверность и область применения модели.

В качестве зависимости $\epsilon_m = f(B, \sigma)$ использована формулировка, предложенная японским автором Симидзу и уточнённая в настоящей работе к виду (2), позволяющему распространить её на различные магнитострикционные материалы,

$$\epsilon_m = \frac{3}{2} \lambda_s k (B)^{2/3} n^k, \quad k = \frac{n}{3} \frac{1}{1 + (\frac{n}{2} - 1) e^{2\sigma}}, \quad (2)$$

где λ_s - магнитострикция насыщения, $\delta = \frac{B}{B_s}$ - относительная индукция (B_s - индукция насыщения), $\sigma = \frac{\sigma^*}{\sigma_0}$ - относительные механические напряжения (σ^* - постоянная материала, имеющая тот же знак, что и λ_s), n - постоянная материала. Принципиальной особенностью этой формулировки является учёт магнитоупругого взаимодействия введением механических напряжений в качестве независимого параметра. Это обстоятельство позволяет показать, что магнитострикционный эффект в стержневом преобразователе сводится не только к двум сосредоточенным торцевым силам, как это делается во всех известных работах, но и к распределённой "магнитострикционной" нагрузке.

Аппроксимация зависимости $H=f(B, \sigma)$ предложена в настоящей работе в виде

$$H(B, \sigma) = H^L(B) + H^S(B, \sigma) = \alpha \cdot \sin \beta B + \frac{n \lambda_s \sigma^*}{21 B_s} \cdot \delta \cdot E i[n/2] e^{2\delta} \ln \delta j_0 \cdot (3)$$

Здесь первое слагаемое является моделью ферромагнитного сердечника, лишенного магнитострикционных свойств (α, β - параметры аппроксимации, определяемые экспериментально). Второе - математическая модель магнитоупругого взаимодействия, форма которой получена на основании термодинамических соотношений с использованием зависимости (2) (l - длина средней магнитной линии).

Для исследования связанной колебательной системы интерес представляют не сами функциональные зависимости (2) и (3), а их гармонический анализ при периодическом изменении B и σ , выполненный с учётом принятых допущений о характере колебаний на каждой ступени. Так, на основании гармонического анализа выражения (2) показано, как при известной форме вынужденных колебаний сердечника могут быть определены "магнитострикционные" вынуждающие нагрузки. В аналитической форме рассмотрен случай питания преобразователя от источника напряжения, численно - случай питания от источника тока (рис. 1, 2). Сделан вывод, что существует такое сочетание внешних условий работы МСП с активными стержнями постоянного сечения, когда магнитоупругое взаимодействие не оказывает влияния на энергетические характеристики, и допустимо сведение магнитострикционного эффекта только к сосредоточенным торцевым "магнитострикционным" силам. Это случай активного характера нагрузки и совпадения рабочей частоты с собственной частотой сердечника. В остальных случаях следует учитывать магнитоупругое взаимодействие, например, дополнительным введением распределённой "магнитострикционной" нагрузки.

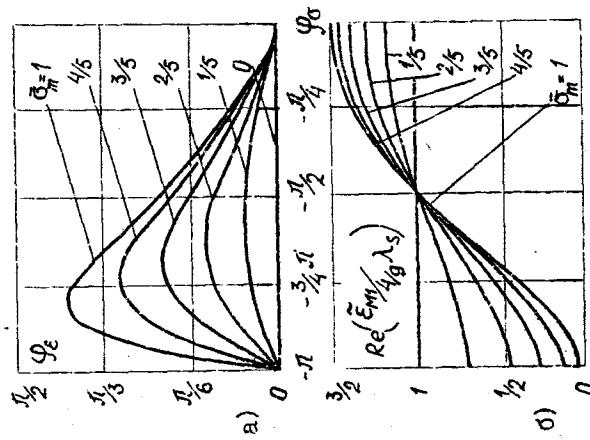


Рис. 2. Зависимость фазы (а) и вещественной составляющей (б) амплитуды основной гармоники деформации магнитострикции $\dot{\epsilon}_{m1}$ от фазы механических напряжений $\dot{\sigma}_0$

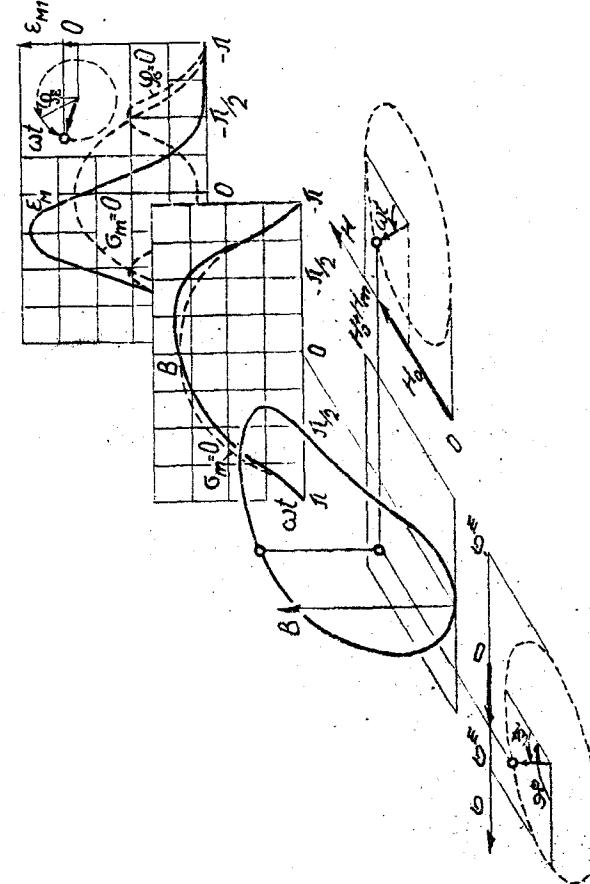


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма определения магнитного и магнитострикционного состояния при питании преобразователя от источника тока

На основании гармонического анализа выражения (3) решена в аналитической форме задача согласования МИУ с электрическим усилителем. Известно использование с этой целью параллельного преобразователя подстроичного конденсатора, позволяющего локализовать высокие амплитуды тока только внутри полученного электрического резонансного контура и скомпенсировать реактивную составляющую тока через цепь усилителя. В настоящей работе предложено, кроме того, минимизировать и активную составляющую. Для этого достаточно подобрать такое число витков обмотки n_1^* , при котором достигается равенство двух составляющих активного тока, обусловленных, соответственно, потерями на магнитной стороне и магнитоупругим взаимодействием:

$$n_1^* = \sqrt{\frac{\sigma_p}{2\omega} I \epsilon_{M1} \sigma_m}, \quad (4)$$

где σ_p - коэффициент электромагнитных потерь, ϵ_{M1} - амплитуда основной гармоники деформации магнитострикции, ω - рабочая частота.

Для исследования адекватности модели и области её применимости выполнена экспериментальная проверка полученной зависимости вещественной составляющей основной гармоники деформации магнитострикции (то есть той компоненты, которая непосредственно участвует в преобразовании энергии) от параметров магнитного состояния

$$Re(\tilde{\epsilon}_{M1}) = n \lambda_s b_0^{n-1} b_m, \quad (5)$$

($\tilde{\epsilon}_{M1}$ - комплексная амплитуда основной гармоники деформации магнитострикции, b_0 и b_m - постоянная составляющая и амплитуда основной гармоники относительного значения магнитной индукции). Эксперименты проводились на 10-килогерцевом никелевом преобразователе как при отсутствии механических напряжений (на частоте 150 Гц), так и при механических напряжениях, близких к предельным (на частоте механического резонанса). Деформация магнитострикции регистрировалась с помощью германиевого дендритного тензорезистора, наклеенного вдоль силовых магнитных линий на ярмо сердечника. Для выделения первой гармоники использовался анализатор спектра СК4-56. Компоненты b_0 и b_m получались аппаратурным интегрированием ЭДС самоиндукции вторичной измерительной обмотки. Результаты экспериментов показали удовлетворительное совпадение с расчётом (рис.3).

Экспериментально проверена зависимость амплитуды основной гармоники поля магнитоупругого взаимодействия H_m^B от амплитуды механи-

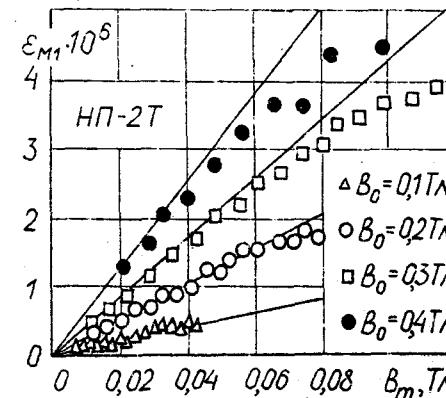


Рис.3. Результаты замеров вещественной составляющей основной гармоники деформации магнитострикции

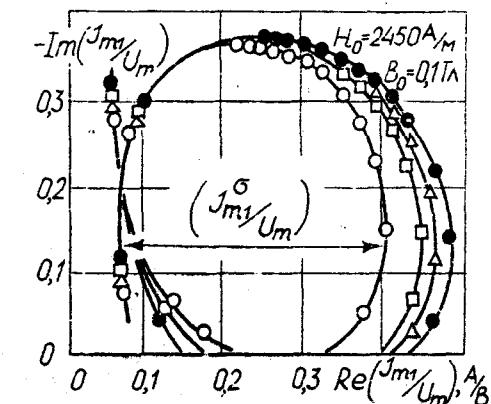


Рис.4. Круговые диаграммы электрической проводимости

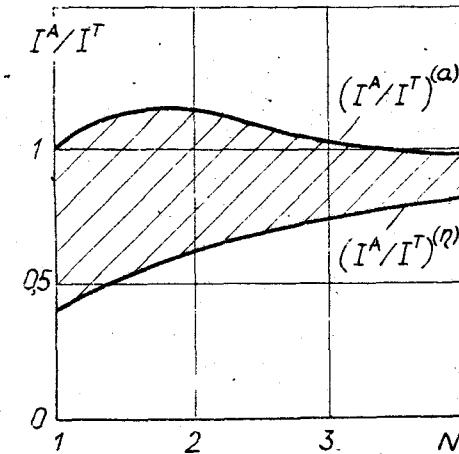


Рис.5. Относительные значения интенсивности излучения АМСП, полученные в рамках оптимизационной задачи (7)

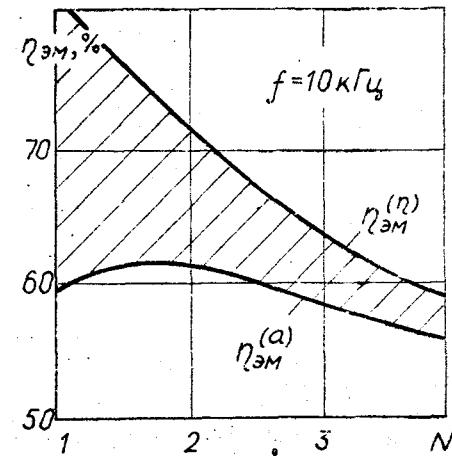


Рис.6. Значения электромеханического КПД "ампульного" преобразователя, полученные в рамках оптимизационной задачи (7)

ческих напряжений σ_m , полученная на основании гармонического анализа выражения (3),

$$H_{m1}^{\sigma} \approx -\frac{n\lambda_s}{2LB_s} \cdot B_0^{n-1} \cdot \sigma_m. \quad (6)$$

Проверка выполнялась на МИУ с "ампульным" никелевым 10-килогерцевым преобразователем и коническим концентратором. В диапазоне частот 8 + 12 кГц строились круговые диаграммы электрической проводимости при постоянных значениях поля подмагничивания H_0 и компоненты индукции B_m (следовательно, при одинаковых B_0), но с установкой на стенд полуволновых образцов из разных материалов. Последнее обеспечивало разные амплитуды механических колебаний, для регистрации которых использовался тензодатчик на концентраторе МИУ. Амплитуды σ_m оценивались по активной составляющей электрической проводимости $Re(J_m U_m)$, обусловленной механическими колебаниями (рис.4). Анализ результатов показал хорошее выполнение зависимости (6).

ВЫБОР РЕЖИМА РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Обязательным этапом проектирования МИУ является оценка энергетических возможностей МСП, а следовательно, и выбор параметров режима его работы. Выполненный обзор литературы показал, что полных ответов на эти вопросы не получено и необходимы дополнительные исследования. Предложенная модель позволяет связать наиболее распространённые критерии выбора режима работы МСП с магнитными и, соответственно, электрическими параметрами. Анализировались следующие критерии: максимума коэффициента электромеханической связи, максимума магнитострикционной постоянной, максимума амплитуды вынуждающей силы, максимума КД (для рассматриваемого случая – электромеханического). В результате задача выбора режима работы МСП была сведена к задаче нелинейной оптимизации с целевой функцией, представляющей линейную комбинацию удельной отдаваемой энергии Q и электромеханического КД η_{em}

$$F = C_1 \cdot \eta_{em} + C_2 Q \quad (7)$$

(C_1, C_2 – весовые коэффициенты). В качестве варьируемых параметров приняты подмагничивание, переменная составляющая входного параметра на магнитной стороне (при питании от источника тока этим параметром является амплитуда напряжённости магнитного поля, а при питании от источника напряжений – амплитуда магнитной индукции) и

амплитуда максимальных механических напряжений в сердечнике. Ограничения обусловлены магнитным насыщением и условием прочности.

Общее решение задачи выполнено численно. В аналитической форме задача решена для частного случая – максимизация отдаваемой энергии. Использован симплекс-алгоритм Нелдера-Мида с деформируемым многогранником и вводом ограничений по методу скользящего допуска. Показано, что решение для произвольного сочетания критериев оптимальности в целевой функции (7) лежит между решениями, соответствующими максимуму отдаваемой энергии и максимуму КД.

Предлагаемая модель МСП адаптирована для случая, когда активные стержни имеют переменную площадь поперечного сечения. В частности, исследован преобразователь с сердечником в форме стержня, равнопрочного при колебаниях по первой собственной форме ("ампульный" преобразователь – АМСП). Такая форма сердечника позволяет увеличить выходную виброскорость без увеличения максимальных механических напряжений. Показано, что: 1) на предельных по отдаваемой мощности режимах применение АМСП позволяет повысить интенсивность излучения (рис.5, $(I_{Tf}^A)^{(2)}$ – отношение интенсивности излучения АМСП к аналогичной величине для сердечника традиционной формы, Λ – отношение максимальной и минимальной площадей поперечного сечения сердечника АМСП, $\Lambda = 1$ – случай традиционной формы), причём, при более высоком электромеханическом КД $\eta_{em}^{(2)}$ (рис.6); 2) максимально достижимые КД "ампульного" ($\eta_{em}^{(2)}$ на рис.6) ниже, чем у традиционного, но соответствуют более высоким интенсивностям излучения ($(I_{Tf}^A)^{(2)}$, рис.5); 3) при разных площадях излучающего торца "ампульная" форма сердечника имеет большую поверхность охлаждения, что облегчает удовлетворение теплового ограничения на предельно отдаваемую мощность. Особенности энергетических характеристик АМСП позволяют рекомендовать его применение в установках для усталостных испытаний.

Выбор приоритета критериев оптимальности, другими словами, соотношения коэффициентов C_1 и C_2 в целевой функции (7) представляет отдельную задачу. Он должен основываться на анализе конкретных требований к амплитудному, частотному, энергетическому диапазонам работоспособности МИУ и условий её эксплуатации. Обсуждение этих вопросов выполнено в следующем разделе.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК МИУ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ ПРИ СИММЕТРИЧНЫХ ЦИКЛАХ РАСТЯЖЕНИЯ-СКИДАНИЯ. При проектировании МИУ для испытаний образцов из заданной группы материалов в качестве критерия оптимальности принят мини-

мум максимальной мощности потребляемой стендом электрической энергии

$$\min(F), F = \max(P_{\text{ЭЛ}}), P_{\text{ЭЛ}} = \omega \frac{W^H}{\eta_{\text{ЭМ}}}, \quad (8)$$

где W^H – энергия рассеяния в нагрузке, последней в рассматриваемом случае являются образец и концентратор. Согласно (8), определение целевой функции F предполагает совместное решение двух задач: первая – выбор режима работы МСП, обеспечивающего преобразование электрической энергии в механическую (а именно, максимум $\eta_{\text{ЭМ}}$) для испытаний того образца и на тех уровнях механических напряжений, когда установка потребляет максимальную электрическую энергию; вторая – проектирование механической части, наилучшим образом использующей эту энергию (минимум W^H).

Решение этих относительно самостоятельных задач связано двумя условиями, включающими одновременно параметры и одной и другой задачи: первое – равенство энергии, генерируемой МСП, и энергии, рассеиваемой на внутреннее трение в нагрузке (энергетическое условие согласования); второе – коэффициент усиления виброскоростей стендса должен обеспечивать достижение рабочих виброскоростей образца при заданных виброскоростях режима работы преобразователя (кинематическое условие согласования).

Из общего числа параметров, подлежащих определению в процессе проектирования, были выделены те, что не могут быть получены непосредственно из условий согласования и ограничений, то есть являются варьируемыми для рассматриваемой задачи. Такими параметрами оказались: диаметр рабочей части образца, его коэффициент усиления виброскоростей, режим работы преобразователя. Зависимость целевой функции от варьируемых параметров исследовалась численно. Показано, что:

- диаметр рабочей части образца должен выбираться минимальным;
- коэффициент усиления образца имеет оптимальное значение;
- для обеспечения работоспособности МИУ под испытания груши материалов достаточно, чтобы мощность МСП удовлетворяла энергетическому условию согласования для "определенного" материала – то есть материала с наибольшим отношением

$$\Omega_i = \frac{\Delta_i(\sigma_i^{0*}) \cdot \sqrt{E_i/\rho_i} \cdot \sigma_{\text{max}}^{0*}}{\sigma_i^{0*}} \quad (9)$$

(где $\Delta_i(\sigma_i^{0*})$ – потери энергии в i -м материале при самом высоком

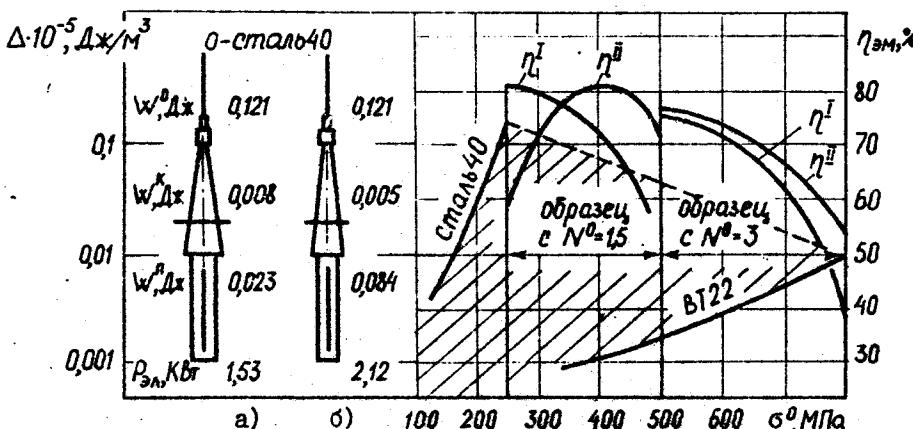


Рис. 7. Изменение электромеханического КПД универсального стенда при испытаниях различных материалов

планируемом к испытаниям уровне амплитуд механических напряжений σ_i^{0*} ; $\sigma_{\text{max}}^{0*} = \max(\sigma_i^{0*})$ – амплитуда механических напряжений наиболее прочного из группы материала), а коэффициент усиления виброскоростей стендса – кинематическому условию согласования при испытаниях самого прочного из заданной группы материала;

- проектирование МИУ должно обеспечивать режим максимума КПД МСП при испытаниях "определенного" материала на максимальных для него амплитудах (на рис.7 показано изменение КПД стендса при испытаниях материалов из некоторой заданной группы, существенно отличающихся как прочностными так и вибропоглощающими свойствами, для двух вариантов МИУ: проект а) – при испытаниях "определенного" материала (сталь 40) МСП работает в режиме максимума КПД, проект б) – испытаниям "определенного" материала соответствует режим максимума отдаваемой энергии; приведено распределение потерь энергии в элементах стендса при испытаниях "определенного" материала);
- дифференцированный выбор коэффициентов усиления образцов при проведении испытаний на универсальном стенде позволяет расширить диапазон используемых материалов при улучшении энергетических характеристик испытательной установки;
- опасными в смысле возможности перегрева МСП могут быть не только

испытания, при которых потребляется максимальная электрическая энергия, но и испытания, требующие максимальных виброскоростей МСИ.

Вывод о целесообразности уменьшения поперечных размеров МИУ потребовал исследования динамической устойчивости (ДУ) как ограничения на это уменьшение. Разработана методика расчётного исследования ДУ элементов вибростенда, выполнены аналитический и численный анализ ДУ, выделены геометрические параметры стенда, ответственные за обеспечение ДУ и определены области их допускаемых значений.

Выполненные исследования использованы при проектировании универсальной МИУ, которая изготовлена и эксплуатируется в лаборатории кафедры "Сопротивление материалов, динамика и прочность машин" ЧПИ.

МИУ для испытаний натурных деталей. Для проведения усталостных испытаний натурных объектов типа лопаток колёс турбин и компрессоров на высоких звуковых частотах в качестве вибровозбудителя рассмотрен стержневой магнитострикционный преобразователь. Высокий коэффициент усиления виброскоростей и незначительный уровень потерь энергии в объектах указанного типа обуславливают возможность их резонансного возбуждения вплоть до усталостного разрушения при работе МСИ не только в резонансном, но и в квазистатическом режиме. Последнее обстоятельство придаёт магнитострикционной установке новое нетипичное качество — широкий рабочий частотный диапазон, что позволяет на одном вибровозбудителе испытывать лопатки неразъёмных колёс, отличающиеся значительным разбросом собственных частот, а также лопатки различных ступеней газотурбинных двигателей.

Построены и исследованы модели системы МСИ с испытываемым высокочастотным объектом типа рабочей лопатки или малоразмерного рабочего колеса. Найдены предпочтительные схемы механической части колебательной системы и пределы применимости квазистатического режима работы вибровозбудителя.

На разработанной установке проведены испытания лопаток различных осевых и радиально-осевых турбинных и компрессорных колёс, которые подтвердили возможность использования квазистатического режима работы МСИ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для решения задач совершенствования магнитострикционных испытательных установок предложен подход, предполагающий одновременное достижение наилучших условий преобразования высокочастотной энергии (выбором параметров режима работы преобразователя)

и её использования (выбором параметров механической части).

2. Применительно к задаче оптимального проектирования разработана и экспериментально проверена модель устанавлившегося режима работы магнитострикционного преобразователя как связанной нелинейной электро-магнито-механической колебательной системы.

3. На основании модели показано, что существует такое сочетание внешних условий работы магнитострикционного преобразователя с активными стержнями постоянного сечения, когда магнитоупругое взаимодействие не оказывает влияния на энергетические характеристики, и допустимо сведение магнитострикционного эффекта только к сосредоточенным торцевым "магнитострикционным" силам. Это случай активного характера нагрузки и совпадения рабочей частоты с собственной частотой сердечника. В остальных случаях следует учитывать магнитоупругое взаимодействие, например, путём дополнительного введения распределённой "магнитострикционной" нагрузки.

4. Предложен нелинейный вариант электрической схемы замещения магнитострикционного преобразователя. В аналитической форме решена задача расчёта электрического резонансного контура, включающего магнитострикционный преобразователь.

5. Выбор параметров режима работы магнитострикционного преобразователя сведён к решению задачи нелинейной оптимизации по предложенному обобщённому энергетическому критерию, представляющему линейную комбинацию коэффициента полезного действия и удельной отдаляемой в нагрузку энергии.

6. В рамках сформулированной оптимизационной задачи выполнены расчёты, предельно достижимых значений энергетических характеристик стержневого преобразователя традиционной формы. Сопоставлением полученных результатов расчёта с режимами, соответствующими общепринятым критериям максимума коэффициента электромеханической связи и максимума магнитострикционной постоянной, показана предпочтительность предложенного обобщённого энергетического критерия для задачи выбора режима работы. Проанализированы особенности работы преобразователя на частотах, отличных от собственной частоты сердечника, и при комплексном характере нагрузки, когда наличие магнитоупругого взаимодействия отражается на энергетических характеристиках.

7. Модель магнитострикционного преобразователя адаптирована к случаю сердечника с активными стержнями переменного сечения. Выполнены расчёты предельно достижимых энергетических характеристик "импульсного" преобразователя и сравнение их со случаем традицион-

кой формы сердечника, позволяющее рекомендовать применение "ампульного" преобразователя в установках для усталостных испытаний.

8. Предложена и обоснована методика проектирования магнитострикционных установок для усталостных испытаний образцов при симметричных циклах растяжения-сжатия, основанная на совместном решении задач оптимизации параметров режима работы преобразователя и параметров механической части. Методика реализована в Методических рекомендациях Госстандарта МР 167-85 "Метод расчёта магнитострикционных вибростендов для усталостных испытаний". Рассчитан, спроектирован и изготовлен магнитострикционный стенд с рабочей частотой 10 кГц, позволяющий проводить усталостные испытания образцов из любого современного металлического конструкционного материала.

9. Выполнен анализ динамической устойчивости магнитострикционной установки для усталостных испытаний образцов при симметричных циклах растяжения-сжатия. Показана принципиальная возможность уменьшения поперечных размеров установки относительно используемых в настоящее время, что позволяет улучшить энергетические характеристики стендов и повысить достоверность результатов усталостных испытаний за счёт возможности более эффективного охлаждения сильно саморазогревающегося в процессе испытаний образца.

10. Разработана методика проектирования магнитострикционной установки для испытаний натурных деталей типа лопаток колёс турбин и компрессоров, обладающей нетрадиционным для высокочастотных резонансных систем качеством – возможностью работы в широком диапазоне частот. На созданной лабораторной установке проведены испытания различных осевых и радиально-осевых турбинных и компрессорных колёс. Методика проектирования и разработанная на её основе испытательная установка внедрены в СКБ "Турбина" (г. Челябинск).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Слива О.К., Романов В.А. Оптимизация режима работы магнитострикционного преобразователя // Стантартизация методов расчёта и испытаний на колебания и устойчивость. – М.: Издательство стандартов, 1985. – Вып.6 – С.60-67.

2. Расчёты и испытания на прочность. Метод расчёта магнитострикционных вибростендов для усталостных испытаний. Методические рекомендации МР 167-85 / Гохфельд Д.А., Слива О.К., Ковадло А.А., Романов В.А. – М.: ВНИИМаш, 1985. – 28 с.

3. Романов В.А., Слива О.К. Оптимизация параметров магнитострикционных вибростендов для усталостных испытаний // Проблемы оптимизации в машиностроении: Тезисы Второй Всесоюзной школы молодых учёных и специалистов, 16-22 мая 1986 г. – Харьков: ХИИ. – С.141.

4. Романов В.А., Слива О.К., Слободкина А.Г. Программа оптимизации режима работы магнитострикционного преобразователя // Проблемы оптимизации в машиностроении: Вторая Всесоюзная школа молодых учёных и специалистов. Классификатор математического обеспечения. – Харьков: ХИИ, 1986. – С.22.

5. Романов В.А., Слива О.К. Программа автоматизированного проектирования магнитострикционных вибростендов для усталостных испытаний образцов материалов // Проблемы оптимизации в машиностроении: Вторая Всесоюзная школа молодых учёных и специалистов. Классификатор математического обеспечения. – Харьков: ХИИ, 1986. – С.23.

6. Романов В.А. Магнитострикционный преобразователь "ампульной" формы // Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузлениях: Тематический сборник научных трудов / Под ред. Д.А.Гохфельда и О.С.Садакова – Челябинск: ЧИИ, 1986. – С.129-133.

7. Романов В.А., Слива О.К. К проектированию магнитострикционного стендса для усталостных испытаний / Челяб.политех.ин-т. – Челябинск, 1987. – 17 с. – Библиогр.: 5 назв. – Деп. в ЦНИИТЭМ 13.03.87, № 3706 – пр.87.

8. Ковадло А.А., Романов В.А., Слива О.К. Усталостные испытания высокочастотных натурных объектов на магнитострикционном вибровозбудителе // XXII Всесоюзное научное совещание по проблемам прочности двигателей: Тезисы докладов. – М.: ИПМех АН СССР, 1988. – С.II5-II6.

9. Романов В.А., Слива О.К. Совершенствование магнитострикционных установок для усталостных испытаний образцов и натурных деталей // Прочность материалов и элементов конструкций при звуковых и ультразвуковых частотах нагружения: Тезисы докладов Всеобщей конференции. – Киев: ИПМ АН УССР, 1988. – С.81.

Романов