

ММ 96572

Московское

ордена Ленина, ордена Октябрьской революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

СТРУПИНСКИЙ МИХАИЛ ЛЕОНИДОВИЧ

УДК 539.384.4:621.315.2.029.6.001.24(043.3/75)

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГИБКИХ СТЕРЖНЕЙ
В ПРИЛОЖЕНИИ К АНАЛИЗУ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

Специальность 01.02.06 - Динамика и прочность машин,
приборов и аппаратуры

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Москва - 1989

Работа выполнена в Особом ордена Знак Почета конструкторском бюро кабельной промышленности (ОКБ КП).

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
В. Л. Бидерман

Официальные оппоненты: *з.т.н. Шаповалов Л. А.*
и.т.н. Каравайцев А. В.

Ведущая организация - *Горьковский научно-исследовательский машиностроительный институт*

Защита состоится "4" января 1989 г. в 14 час. 30 мин на заседании специализированного совета Д 053.15.08 в Московском высшем технич

С диссертаци
высшего тех

СКОВСКОГО

Автореферат

Ученый секр
специализир
Д 053.15.08

1496572

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1496572

СТРУПИНСКИЙ М. Л. Численный

Актуальность работы. Развитие современной техники обусловило создание в различных отраслях машиностроения целого ряда конструкций, расчетная схема которых близка к модели гибкого стержня. Среди машиностроительных изделий появился ряд конструкций упругих лепестковых муфт, резинометаллических амортизаторов, гибких соединителей и других деталей машин и приборов, при проектировании которых необходимо проведение расчетов стержневых элементов с учетом существенной геометрической нелинейности задачи.

В последние годы как в отечественной, так и в зарубежной практике наблюдается растущий интерес к разработке и использованию радиочастотных кабелей (РК) полужестких гибких и особо гибких конструкций с улучшенными механическими характеристиками — малой изгибной жесткостью и повышенной стойкостью к циклическому изгибу. Современные конструкции РК с улучшенными механическими характеристиками находят применение в составе подвижных фазированных антенных решеток, СВЧ-фазометров, осциллографов с малыми временами развертки, стробоскопических осциллографов и большого числа функциональных устройств.

Использование РК различных конструкций в составе подвижных радиоэлектронных устройств обуславливает необходимость учета механических свойств кабеля и их изменений в процессе подвижной эксплуатации на этапе проектирования этих устройств. Механические характеристики кабелей оказывают существенное влияние на ряд технических характеристик аппаратуры. Для решения практически важной задачи определения этого влияния, а также для обоснованного переноса данных ресурсных испытаний кабелей на оценку их ресурса в условиях конкретных технических устройств, возникла необходимость разработки методики расчета механического поведения кабелей (форм равновесия, усилий, передаваемых на узлы аппаратуры, напряженно-деформированного состояния в сечениях кабеля) при различных условиях подвижной эксплуатации. При этом необходим учет как физической нелинейности, связанной со свойствами материалов элементов кабеля, так и геометрической нелинейности, обусловленной значительными перемещениями и углами поворота РК в процессе изгиба.

Важным средством повышения технического уровня кабельных



изделий, степени их надежности и улучшения технических параметров является разработка методов расчета характеристик прочности и жесткости радиочастотных кабелей при изгибе, учитывающих реальные физико-механические свойства материалов, используемых в конструкциях кабелей. Создание РК с малой изгибной жесткостью, нормированной величиной изгибающего момента и высокой стойкостью к циклическому изгибу делает необходимым прогноз механических характеристик изделия на этапе его проектирования. Разработка уточненных методик расчета изгибной жесткости кабелей является необходимой составной частью расчетов, связанных с анализом поведения кабелей в конкретных устройствах современной техники.

Использование РК в качестве радиочастотных линий передачи, связывающих неподвижные узлы аппаратуры с подвижными антенными устройствами, узлами робототехнических комплексов, элементами следящих систем обуславливает необходимость создания методов экспериментального определения характеристик прочности и жесткости кабелей при однократном и циклическом изгибе. Создание методики и аппаратного обеспечения для определения зависимости изгибающего момента от кривизны оси образца кабеля при чистом изгибе является основой для обоснованного прогноза ресурса изделия при многократных изгибах в процессе подвижной эксплуатации.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка численного метода расчета гибких стержней, методов расчета механического поведения кабельных изделий в процессе эксплуатационных изгибов с приближенным учетом физической нелинейности свойств материалов их элементов и методов расчета механических характеристик радиочастотных кабелей.

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в том, что разработан численный метод расчета гибких упругих стержней при пространственном деформировании, а также его модификация для расчета гибких стержней с учетом нелинейных свойств материалов при плоском изгибе. Разработаны методы расчета на прочность и жесткость конструктивных элементов радиочастотных кабелей и различных конструкций кабелей в целом, учитывающие физически нелинейные свойства материалов, используемых в РК. Методы расчета позволяют определить напряжения и деформации в элементах конструкций кабелей, дают возможность оценивать прочность конструкций при однократном и циклическом деформировании.

На основе модели кабеля в виде гибкого стержня из ма-

материала, механические свойства которого в общем случае нелинейны, были разработаны методы решения задач, связанных с деформацией кабельных изделий, установленных на подвижных узлах машин, приборов и аппаратуры. Численная реализация этих методов позволила решить ряд актуальных задач расчета кабеля, связанного с совершающей периодическое движение платформой. При этом рассмотрены различные варианты физико-механических свойств кабеля в широком диапазоне соотношений геометрических размеров устройства. Задачи решались в квазистатической постановке.

На основе разработанной методики оказалось возможным и решение других важных технических задач. В частности, ее использование позволило решить задачу о пространственной деформации лепестка упруго-компенсирующей муфты с учетом действия центробежной нагрузки при значительных углах закручивания муфты.

Разработана новая методика экспериментального определения механических характеристик радиочастотных кабелей при чистом изгибе, позволяющая обоснованно нормировать прочностные и жесткостные свойства РК различных конструкций. На основе разработанной методики создан автоматизированный стенд для определения механических характеристик кабельных изделий при однократном и циклическом изгибе. Управление процессом с помощью ЭВМ допускает задание произвольной программы испытаний.

Практическая ценность. Предложенная методика решения физически и геометрически нелинейных задач статики гибких стержней при плоском изгибе позволяет рационально проектировать узлы подвижных частей приборов и машин, на которые воздействуют присоединенные кабели, обоснованно переносить результаты ресурсных испытаний РК на оценку стойкости кабеля при изгибе в конкретном техническом устройстве. Результаты, полученные при использовании этой методики для расчета крутильной жесткости резинового лепестка упруго-компенсирующей муфты, применены в разработке ряда типоразмеров упругих лепестковых муфт.

Предложенные методы расчета механических характеристик радиочастотных кабелей позволяют обоснованно учитывать и целенаправленно изменять механические свойства изделия на этапе его проектирования. В совокупности с известными из экспериментов характеристиками циклической прочности металлов внешних проводников они позволяют оценивать прочностные свойства кабельных изделий при циклическом нагружении.

Созданный автоматизированный стенд для измерения момента изгиба и характеристик усталостной прочности образцов в виде стержней позволяет определять и нормировать механические характеристики кабельных изделий при чистом изгибе, проводить испытания на циклический изгиб при различных коэффициентах асимметрии циклов, а также испытания на релаксацию и ползучесть в условиях чистого изгиба.

Реализация результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, полученные в ходе работы, реализованы в проведенных в 1984-1988 гг. НИР, направленных на создание кабелей для систем кабельного телевидения, гибких фазостабильных кабелей и полужестких кабелей повышенной гибкости.

На основании выполненных работ: разработан численный метод расчета гибких упругих стержней при пространственном деформировании с учетом геометрической нелинейности, а также его модификация, позволяющая решать нелинейные задачи статики гибких стержней из физически нелинейных материалов. Разработана методика расчета механических характеристик ряда конструктивных элементов радиочастотных кабелей, в том числе внешних проводников кабелей в виде медной гофрированной трубки. Результаты этих расчетов были использованы при создании ряда новых конструкций радиочастотных кабелей, обладающих повышенной гибкостью и прочностью при циклическом изгибе. Решен ряд задач расчета кабелей, установленных на функциональных узлах и устройствах радиоэлектронной аппаратуры в условиях подвижной эксплуатации с учетом физической нелинейности материалов кабеля и значительной величины перемещений точек его оси при деформации. Разработанный алгоритм был использован также при расчете лепестковой упруго-компенсирующей муфты при значительных углах закручивания. Результаты этого расчета были использованы при подготовке ОСТА 95.10000-83 "Муфты упругие лепестковые".

Разработана, изготовлена и внедрена в измерительную практику Особого конструкторского бюро кабельной промышленности машина для испытаний образцов кабелей при изгибе. На ее основе разработан и изготовлен автоматизированный стенд для измерения механических характеристик кабельных изделий при однократном и циклическом изгибе.

На защиту выносятся: 1. Численный метод расчета гибких стержней при больших перемещениях и углах поворота. 2. Метод

расчета гибких стержней с учетом геометрической и физической нелинейности. 3. Методика расчета механических характеристик конструктивных элементов радиочастотных кабелей с учетом нелинейности механических свойств материалов. 4. Методика измерения характеристик жесткости и прочности радиочастотных кабелей при изгибе. 5. Методика расчета лепестка упруго-компенсирующей муфты при значительных углах закручивания и действии центробежной нагрузки.

Апробация работы. Основные результаты докладывались и обсуждались: - на 7-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития кабелей связи в 12-й пятилетке", г.Бердянск, 1986 г., - на 5-ой отраслевой конференции молодых специалистов кабельной промышленности, г.Куйбышев, 1987 г.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 2-х статьях, одном описании к авторскому свидетельству, в тезисах к одному докладу.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 142 страницах машинописного текста, содержит 44 рисунков, 2 таблицы, список литературы из 81 наименований и три приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе содержится обзор литературы по теме исследований. Рассмотрены классические нелинейные уравнения теории гибких стержней, а также основные пути ее развития. Анализ современных работ показал, что такими путями являются: вывод точных нелинейных соотношений для параметров изменения кривизны оси деформированного стержня на основе формулы для конечного поворота и получение физических уравнений, связывающих обобщенные деформации в сечении с силами, моментами и бимоментом, на основе предположений о характере деформирования сечения, более общих, чем известная кинематическая гипотеза Кирхгофа-Лява.

Рассмотрен ряд работ, посвященных аналитическим и численным методам решения нелинейных задач статики гибких стержней. Проанализированы методы линеаризации нелинейных уравнений равно-

веса и кинематических соотношений, а также пути их уточнения.

Круг работ, посвященных решению как геометрически, так и физически нелинейных задач статики гибких стержней, весьма узок. В то же время показано, что характер напряженного состояния в сечении гибкого стержня при плоском изгибе позволяет численно построить физические уравнения

$$M = M(\alpha, e) \quad N = N(e, \alpha) \quad (I)$$

связывающие обобщенные деформации - кривизну оси α и осевую деформацию e - с нормальной силой N и изгибающим моментом M для сечений сложной формы, при условии задания диаграммы деформирования материала стержня, в том числе и найденной экспериментально.

Одним из объектов, использование которых настоятельно требует применения уточненных методов расчета гибких стержней, являются радиочастотные кабели (РК) более чем 200 типов. Особенностью применения РК по сравнению с рядом других кабельных изделий является использование их сравнительно малыми длинами - от 30 - 50 см до 10 метров, в результате чего основным видом механического воздействия для них является изгиб и, в ряде случаев, растяжение. При этом изгиб кабелей, как правило, связан с пластическими и нелинейно упругими деформациями элементов конструкции. Анализ литературных источников показал, что методы расчета характеристик жесткости и прочности РК при изгибе практически отсутствуют.

Разработка методики решения задач статики гибких стержней при плоском и пространственном изгибе в области значительных перемещений и углов поворота позволит рационально проектировать узлы аппаратуры, обоснованно выбирать схемы закрепления в них кабельных изделий, соответствующим образом переносить результаты ресурсных испытаний кабелей на оценку их ресурса в условиях работы в конкретном техническом устройстве. Применение такой методики позволило бы решить ряд актуальных задач современной техники, также сводящихся к расчетной схеме гибкого стержня.

Рассмотрены известные по литературным источникам способы и устройства для испытаний кабельных изделий на прочность и жесткость при изгибе. Отмечено, что в связи с необходимостью проведения испытаний РК при малых радиусах кривизны оси образцов ис-

пользуются способы, реализующие изгиб кабеля на цилиндрических оправках. При этом значительно искажается напряженно-деформированное состояние образца, что приводит к занижению ресурса изделия. Методы измерения изгибной жесткости кабельных изделий, как правило, основаны на измерении коэффициента пропорциональности между нагрузкой и прогибом при различных схемах нагружения и закрепления образца, испытывающего при этом малые упругие деформации. Для измерения прочностных и жесткостных характеристик РК в условиях, близких к эксплуатационным, необходима разработка методики и аппаратного обеспечения испытаний образцов кабельных изделий при чистом изгибе.

По результатам проведенного анализа сформулирована цель и основные задачи данной работы:

- разработка методов решения геометрически нелинейных задач статики гибких упругих стержней, ось которых представляет собой пространственную кривую,

- разработка методов решения задач статики гибких стержней из физически нелинейных материалов при плоском изгибе в области больших перемещений и углов поворота,

- разработка инженерных методов расчета характеристик жесткости и прочности радиочастотных кабелей, учитывающих конструктивные особенности и физико-механические свойства материалов элементов кабелей,

- разработка методики и аппаратного обеспечения испытаний радиочастотных кабелей на прочность и измерения жесткости кабельных изделий в условиях чистого изгиба, позволяющих испытывать образцы кабелей при малых радиусах изгиба без контакта образца с оправками.

Вторая глава посвящена разработке численного метода решения геометрически и физически нелинейных задач статики гибких стержней.

Метод линеаризации нелинейных уравнений равновесия и кинематических соотношений для кривизн изложен в разделе 2.1. Система нелинейных уравнений Кирхгоффа-Клебша связывает проекции вектора усилий $\bar{Q}$ и момента $\bar{M}$ в сечении стержня, проекции вектора перемещений $\bar{u}$, вектора малого угла поворота $\bar{\varphi}$ ($\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$) и вектора кривизн $\bar{\kappa}$ на локальную систему координат, связанную с естественным трехгранником в данной точке оси стержня. Метод линеаризации уравнений равновесия и преобразования геометриче-

ских уравнений позволил получить систему уравнений в приращениях, являющуюся системой обыкновенных дифференциальных уравнений 12-го порядка относительно вектора приращений

$$\Delta \bar{Y} = (u_x, u_y, u_z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z, \Delta Q_x, \Delta Q_y, \Delta Q_z, \Delta M_x, \Delta M_y, \Delta M_z)^T \quad (2)$$

Векторные уравнения относительно приращений

$$\frac{d\bar{U}}{ds} + (1+e)\bar{x} \times \bar{U} + (1+e)\bar{\theta} \times \bar{k} - \mathcal{D}\Delta Q_z \bar{k} = 0$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{ds} + (1+e)\bar{x} \times \bar{\theta} - (1+e)G\Delta \bar{M} - \mathcal{D}\Delta Q_z \bar{x} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta \bar{Q})}{ds} + (1+e)\bar{x} \times \Delta \bar{Q} + (1+e)(G\Delta \bar{M}) \times \bar{Q} + \\ + \mathcal{D}\Delta Q_z \bar{q} + (1+e)\Delta \bar{q} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta \bar{M})}{ds} + (1+e)\bar{x} \times \Delta \bar{M} + (1+e)(G\Delta \bar{M}) \times \bar{M} + \\ + (1+e)\bar{Q} \times (\bar{\theta} \times \bar{k}) + (1+e)\bar{k} \times \Delta \bar{Q} + \\ + \mathcal{D}\Delta Q_z \bar{k} \times \bar{Q} + \mathcal{D}\Delta Q_z \bar{M} + (1+e)\Delta \bar{M} = 0 \end{aligned}$$

В матричном виде система уравнений в приращениях имеет вид

$$\frac{d(\Delta \bar{Y})}{ds} = A \Delta \bar{Y} + F \quad (4)$$

Компоненты матрицы коэффициентов A зависят от геометрии стержня и накопленных значений внутренних силовых факторов, соответствующих нагруженному состоянию стержня в начале шага по параметру нагрузки. Компоненты вектора F зависят от закона изменения внешней нагрузки в процессе нагружения стержня.

В разделе 2.2 описан алгоритм численного решения геометрически нелинейных задач статики пространственных упругих стержней. Он состоит в сведении решения задачи определения положения равновесия стержня, "далекого" (в смысле перемещений точек оси и углов поворота локальных осей координат) от исходного положения равновесия стержня, к решению последовательности линейных задач, эквивалентной пошаговому нагружению вплоть до до-

стижения заданной нагрузки или заданных значений кинематических параметров деформирования стержня. При этом на каждом шаге нагружения перемещения точек оси стержня и углы поворота являются малыми, а геометрия стержня в конце шага нагружения является исходной информацией для следующего шага по нагрузке.

На каждом шаге нагружения решается краевая задача для системы (4) с граничными условиями, соответствующими характеру закрепления концов стержня и способу приложения концевых нагрузок. Компоненты вектора кривизн $\bar{\kappa}$, внутренних усилий $\bar{Q}$, моментов и осевая деформация e в каждой точке оси стержня после n шагов нагружения вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}\bar{Q} &= \sum_{i=1}^n \Delta_i \bar{Q} & \bar{\kappa} &= \bar{\kappa}_0 + \sum_{i=1}^n \Delta_i \bar{\kappa} \\ M &= \sum_{i=1}^n \Delta_i M & e &= \sum_{i=1}^n \Delta_i e\end{aligned}\quad (5)$$

Для определения координат точек оси стержня в глобальной неподвижной системе координат $X_0 Y_0 Z_0$ использован аппарат матриц перехода S от локального базиса, связанного с точкой оси стержня, к глобальным координатам. После n шагов по параметру нагрузки

$$S = S_0 L_1^T L_2^T \dots L_n^T \quad (6)$$

где S_0 — матрица перехода для рассматриваемой точки оси в исходном положении стержня,

$$L = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_z & -\varphi_y \\ -\varphi_z & 1 & \varphi_x \\ \varphi_y & -\varphi_x & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

— матрица малого поворота. Приращения глобальных координат данной точки оси стержня в результате шага нагружения

$$\Delta \bar{r} = S \bar{u} \quad (8)$$

Раздел 2.3 посвящен учету физической нелинейности материалов стержня при плоском изгибе. Получены линеаризованные уравнения в приращениях для деформирования стержня в одной плоскости. При этом нелинейные физические соотношения (I), алгоритм построения которых описан в главе 3, заменяются ли-

$$\begin{aligned}\Delta N &= C_{11} \Delta e + C_{12} \Delta x \\ \Delta M &= C_{21} \Delta e + C_{22} \Delta x\end{aligned}\tag{9}$$

где коэффициенты C_{ij} имеют смысл касательных жесткостей и зависят от точки оси стержня, соответствующей рассматриваемому поперечному сечению, и от обобщенных деформаций e и x , уже накопленных в данном сечении. Отличие алгоритма расчета физически нелинейных стержней от описанного выше состоит в том, что на каждом шаге нагружения решается последовательность линейных краевых задач. После каждого решения производится коррекция значений "упругих параметров" C_{ij} , причем критерием остановки итерационного процесса коррекции служит удовлетворение с заданной точностью нелинейных физических уравнений (I) в конце шага нагружения.

Раздел 2.4 посвящен особенностям численной реализации разработанных алгоритмов. Число точек запоминания информации о глобальном состоянии стержня (вектора кривизн, матрицы перехода к неподвижному базису, радиус-вектора, векторов сил и моментов) принималось равным 26. Для численного интегрирования использовался метод Кутты-Мерсона с постоянным шагом. При решении краевой задачи предпочтение отдавалось методу начальных параметров, однако контроль за обусловленностью системы линейных уравнений для определения вектора начальных параметров позволял при падении точности перейти к использованию метода ортогонализации Годунова.

При решении задач статики стержней из физически нелинейных материалов при плоском изгибе значительный объем памяти занимала информация о состоянии материала в 21 точке по высоте 26 сечений. В наиболее сложном случае материала с памятью (упруго-пластические материалы) она состояла из координат двух последних точек реверса (напряжение и деформация), текущих напряжении и деформации в данной точке и текущем направлении деформирования (см. главу 3).

В качестве тестовой рассмотрено решение задачи о нагружении консольно закрепленного стержня силой, сохраняющей свое направление в процессе деформирования. При этом результаты расчета для стержня из идеально упругого материала с высокой точностью совпали с результатами, полученными Е.П. Поповым с по-

мощью метода упругих параметров. Расчеты были проведены также для стержней из идеально упруго-пластического материала и упруго-пластического материала с линейным упрочнением (отношение модулей $E/E_c = 0,3$). Построены зависимости нагрузка-прогиб для трех моделей материала, при этом результаты расчетов для идеально упруго-пластического материала позволяют сделать вывод о том, что разработанный метод расчета с успехом может быть использован для уточненной оценки несущей способности конструкции при больших перемещениях, а также для анализа схемы потери несущей способности.

В разделе 2.5 дано решение ряда задач статики гибких стержней из физически нелинейных материалов, связанных с подвижной эксплуатацией радиочастотных кабелей. Рассмотрен расчет участка кабеля, один конец которого закреплен неподвижно, а второй связан с платформой, совершающей периодическое движение (рис.1). Построены решения для различных физических моделей кабеля, что соответствует радиочастотным кабелям различных конструкций, а также для различных соотношений геометрических размеров устройства. Найдены формы равновесия кабеля при различных углах поворота платформы, определены усилия, передаваемые со стороны кабеля на платформу (рис.2). Рассмотрено циклическое деформирование кабеля в течение первых трех периодов движения платформы.

Первоначально этот метод был развит автором применительно к расчету упругого элемента лепестковой упруго-компенсирующей муфты [1]. Указанная задача, представляющая значительный самостоятельный интерес, изложена в разделе 2.6. На рис.3 представлена расчетная схема задачи, показано расположение глобальной системы координат и направление центробежной нагрузки. Вектор приращений распределенной нагрузки в этом случае

$$\Delta \bar{q}_i = \omega^2 \frac{\rho F}{1+e} \left[\frac{\Delta \omega^2}{\omega^2} S^T \bar{z}_q - \frac{\Delta e}{1+e} S^T \bar{z}_q + T S^T \bar{z}_q + S^T S_q \bar{u} \right] \quad (10)$$

Граничные условия с учетом симметрии имеют вид

$$\begin{array}{lll} S=0: & u_y=0 & q_z=0 \\ & u_z=0 & \Delta Q_x=0 \\ & q_y=0 & \Delta M_x=0 \end{array} \quad \begin{array}{lll} S=e: & u_x=0 & q_y=0 \\ & u_z=0 & u_y = \frac{d}{2} \Delta \psi \\ & q_x = \Delta \psi & q_z=0 \end{array} \quad (11)$$

где $2\Delta\varphi$ - приращение угла закручивания муфты. В результате численного расчета определены зависимости крутящего момента от угла закручивания муфты при различных частотах вращения, найдена крутильная жесткость муфты и ее изменения в зависимости от угла закручивания и частоты вращения. Показано, что усилия, передаваемые на валы со стороны муфты, существенно зависят от скорости вращения и достигают значительной величины.

В третьей главе рассмотрен расчет жесткостных и прочностных характеристик конструктивных элементов радиочастотных кабелей. На основе модели в виде винтовой пружины получены зависимости для изгибной жесткости изоляции спирального типа. Для изоляции спирального типа зависимость между изгибающим моментом и кривизной оси кабеля имеет кусочно-линейный вид, что связано с соприкосновением витков в процессе изгиба.

Показано, что в результате соприкосновения собственная жесткость изоляции при изгибе возрастает в 2 раза. Приведены зависимости радиуса кривизны кабеля, при котором начинается соприкосновение витков изоляции и резкий рост жесткости кабеля, от геометрических размеров изоляции. На основе модели в виде пакета спиральных пружин рассмотрен приближенный расчет изгибной жесткости внешнего проводника в виде оплетки.

В разделе 3.2 рассмотрен расчет напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов РК сплошного типа, таких, как изоляция в виде трубки из полимерного материала, внешние проводники из металлических труб, защитные оболочки трубчатой конструкции, при изгибе и растяжении с учетом нелинейных физико-механических свойств материалов. При этом вводится система узлов (X_i) по высоте сечения элемента, а нелинейное распределение напряжений аппроксимируется в полосах между точками кусочно-линейными функциями. Считая заданными осевую деформацию ε и кривизну оси кабеля α для рассматриваемого сечения, напряжения в узлах (X_i) находятся с помощью полученной экспериментально или соответствующим образом схематизированной диаграммы деформирования материала $\sigma = f(\varepsilon)$ по формулам

$$\varepsilon_i = \varepsilon + (\alpha - \alpha_0) X_i \quad (I2)$$

$$\sigma_i = f(\varepsilon_i) \quad (I3)$$

Суммарная осевая сила N и изгибающий момент M в сечении

определяются по формулам

$$N = \sum_{i=1}^{n+1} \sigma_i n_i \quad (14)$$

$$M = \sum_{i=1}^{n+1} \sigma_i m_i \quad (15)$$

где n_i , m_i – коэффициенты, зависящие только от геометрии сечения и введенного разбиения.

Раздел 3.3 посвящен учету истории нагружения при расчете металлических элементов конструкций РК, т.к. медь и алюминий, используемые в конструкциях кабелей, обладают ярко выраженными пластическими свойствами. Для описания свойств металлов при циклическом деформировании использован принцип Мазинга. При этом на каждом шаге деформирования для всех точек разбиения определяется, какой именно процесс – активное нагружение или разгрузка, – имеет место, после чего рассчитываются напряжения в сечении. Разработанная методика позволяет численно построить уравнения

$$N = N(e, x) \quad M = M(x, e) \quad (16)$$

связывающие осевую силу и изгибающий момент в сечении с осевой деформацией и кривизной оси для реальных физико-механических свойств материала стержня как при однократном, так и при циклическом деформировании. Определение напряженно-деформированного состояния в сечении элементов кабеля и его изменений при циклическом изгибе дает возможность оценить поведение кабеля при циклическом нагружении, а также найти параметры механического гистерезиса кабеля.

В разделе 3.4 рассмотрен расчет внешних проводников радиочастотных кабелей в виде гофрированных металлических оболочек. Он основан на уравнениях моментной теории оболочек вращения для случая кососимметричного нагружения. Рассмотрены способы аппроксимации геометрии меридионального сечения гофрированной оболочки. Показано, что наличие "высокого" гофра существенно зависит от величины параметра

$$q = \frac{D_n - D_c}{H} \quad (17)$$

где D_n – диаметр оболочки по вершинам гофра, D_c – диаметр оболочки по впадинам гофра, H – шаг гофра. На основании расчетов показано, что жесткость и прочность гофрированных внешних проводников преимущественно

определяются величиной геометрического параметра φ . Это подтверждено результатами анализа зависимости между величиной φ и прочностными свойствами гофрированных внешних проводников серийно выпускаемых радиочастотных кабелей, а также образцов кабелей с "высоким" гофром.

В четвертой главе рассмотрен предложенный автором способ испытаний кабельных изделий при чистом изгибе, описана разработанная методика измерений жесткостных и прочностных параметров кабельных изделий при однократном и циклическом изгибе, отмечены особенности конструкции автоматизированного стенда для испытаний кабельных изделий на изгиб.

Рассмотрены условия, необходимые для обеспечения чистого изгиба образца, представляющего собой гибкий стержень. Показано, что при движении зажима для верхнего конца образца по траектории, заданной в параметрическом виде уравнениями

$$X = \ell \frac{1 - \cos \varphi}{\varphi} \quad Y = \ell \frac{\sin \varphi}{\varphi} \quad (18)$$

где ℓ — длина образца,
 X, Y — координаты подвижного зажима,
 φ — угол поворота подвижного зажима, ось образца в каждый момент времени представляет собой дугу окружности независимо от физических свойств образца при условии их однородности по длине (рис. 4).

Предложена кинематическая схема механизма, осуществляющего движение зажима по указанной траектории. Спроектировано и создано устройство для испытаний кабельных изделий на однократный и циклический изгиб без использования оправок. На его основе создан автоматизированный стенд для измерения механических характеристик радиочастотных кабелей при чистом изгибе. Использование в качестве привода силового шагового двигателя позволяет полностью автоматизировать процесс испытаний, управление которым осуществляется от мини-ЭЕМ.

В разделе 4.5 рассмотрены вопросы измерения фазомеханических характеристик радиочастотных кабелей с помощью автоматизированного стенда. Представлены результаты испытаний образцов радиочастотных кабелей, разрабатываемых в рамках НИР и ОКР.

В диссертации разработан численный метод расчета гибких стержней при больших перемещениях, позволяющий рассчитывать и стержни из физически нелинейных материалов при плоском изгибе. Создано программное обеспечение.

Метод применен к расчету упругих элементов лепестковой муфты, а также к расчету радиочастотных кабелей. Разработана аппаратура для измерения механических характеристик и испытаний на прочность радиочастотных кабелей.

Основные результаты работы являются:

1. Метод и программное обеспечение расчета пространственных стержней при больших перемещениях. Метод основан на пошаговой линеаризации задачи.

2. Метод и программное обеспечение расчета стержней из физически нелинейного материала при плоской деформации с учетом изгиба и растяжения. Получены новые результаты в решении классической задачи об изгибе консольного упруго-пластического стержня силой, сохраняющей свое направление.

3. Метод расчета деформаций упругого элемента лепестковой упруго-компенсирующей муфты при эксплуатационных режимах нагружения. Результаты расчета подтверждены экспериментом и использованы при подготовке ОСТа 95.10000-83.

4. Разработан расчет жесткостных характеристик элементов конструкций радиочастотных кабелей (внутренних и внешних проводников, изоляции). Рассмотрены различные типы проводников (трубки, проволока, обтофированные трубки, оплетка) и изоляции (сплошная изоляция из полимерных материалов, спиральная изоляция). Металлические элементы рассматривались как упруго-пластические, полимерные — как нелинейно упругие.

На этой основе разработаны методы расчета жесткостных характеристик кабелей различных типов при однократном и знакопеременном изгибе. Результаты расчетов подтверждены экспериментами.

5. Разработан метод расчета силовых воздействий, передаваемых кабелем на аппаратуру при подвижном монтаже. Использование этого метода позволяет оптимизировать условия размещения кабеля в аппаратуре.

6. Разработан способ осуществления чистого изгиба образцов кабеля без оправки как при однократном, так и при знакоперемен-

ном изгибе. Этот способ позволяет получать достоверные данные о жесткостных и прочностных характеристиках кабеля в условиях, близких к эксплуатационным. Получено авторское свидетельство № I467432.

7. Создан автоматизированный стенд для измерения жесткостных и прочностных характеристик образцов радиочастотных кабелей при чистом изгибе.

Стенд позволяет испытывать образцы кабельных изделий на однократный и циклический изгиб при разных коэффициентах асимметрии цикла, а также проводить испытания на релаксацию и ползучесть при чистом изгибе. Управление процессом испытаний осуществляется ЭВМ, что позволяет проводить испытания по заданной программе.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Бидерман В.Л., Ряховский О.А., Струпинский М.Л. Расчет крутильной жесткости упругокомпенсирующей муфты // Изв. вузов. Машиностроение.-1983.-№ 12.-С.38-42.

2. Бидерман В.Л., Ряховский О.А., Струпинский М.Л. Расчет лепестковой упругокомпенсирующей муфты // Расчеты на прочность.- 1985.-Вып. 24.-С.79-89.

3. Струпинский М.Л. Исследование механических характеристик радиочастотных кабелей и поведения кабельных изделий при подвижной эксплуатации // Тезисы доклада на 7-ой Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития кабелей связи в 12-ой пятилетке", г.Бердянск, 15-18 сентября 1986 г.-М.,1986.-С.38-39.

4. А.с. I467432 СССР, МКИ ⁴ G 01N3/20. Устройство для испытаний на изгиб / М.Л.Струпинский (СССР).-№ 4I67879/25-28, Заявлено 25.12.86, Опубл. 30.03.89, Бюл.№ 11.

Объем п.л. Тираж экз. Ротапринт ОКБ КП. Заказ
г.Мытищи-2, Моск. обл., ул.Колпакова, 4. Дата 08.89 г.

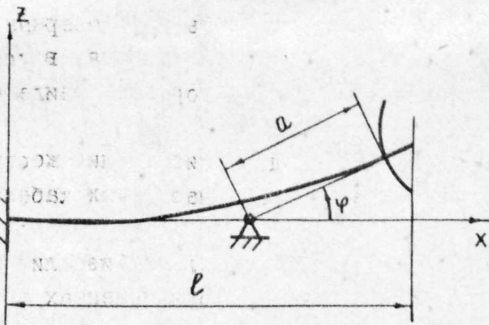


Рис.1.

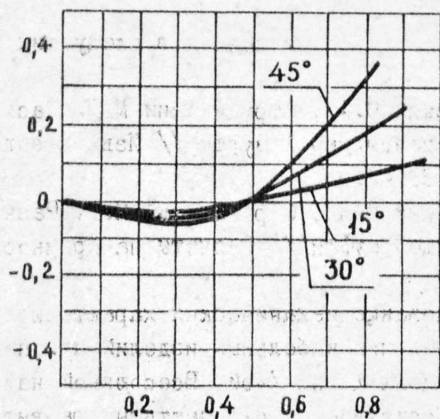


Рис.2.

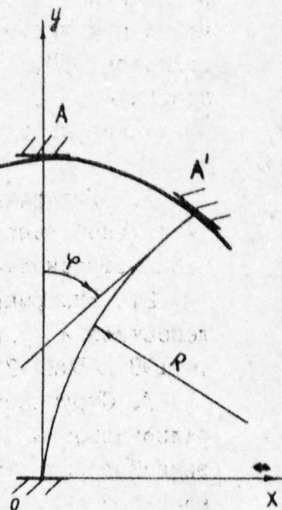


Рис.4.

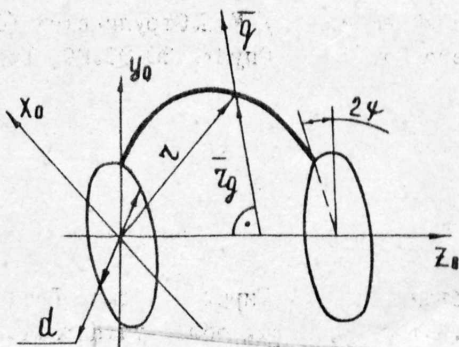
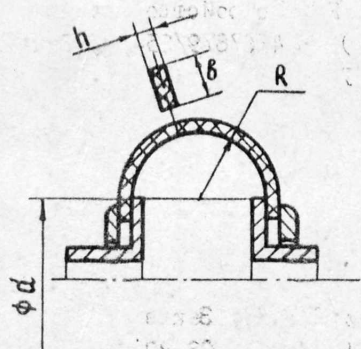


Рис.3.

