

МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕРИЯ ИЗ 7-И МОНОГРАФИЙ

МОНОГРАФИЯ 7 Том II

К.Н. Андрианов Н.Н. Балан В.А. Васин
Е.Н. Ивашов С.В. Степанчиков

МИКРОИНЖЕНЕРИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

НИИТИ

Издательство НИИ ПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
2013

УДК 621.315 + 621.01/.03

ББК 30.3

М.32

Рецензенты: **Глазунов В.А.**, доктор технических наук и доктор философских наук, профессор, заведующий лабораторией Учреждения Российской академии наук Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН,

Шалумов А.С., доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «CALS-технологии»

М 32 Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении: Серия из 7-и монографий. Монография 7. Том II. **К.Н. Андрианов, Н.Н. Балан, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков** Микроинженерия монокристаллического кремния. – Ивантеевка М.о.: Издательство НИИ предельных технологий, 2013. – 220 с.

ISBN 978-5-905872-15-0

В монографии даётся обзор современного оборудования для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского. Показано состояние работ в области создания такого оборудования; обсуждаются методология проектирования надежных, экологически чистых и виброустойчивых механических модулей росто-вого оборудования, включающая методики оценки точности позиционирования ведомого звена волновой резбовой и зубчатой передачи, методики расчета элементов модулей перемещения на привносимый уровень загрязнений в технологический агрегат, методики определения собственных частот и коэффициентов демпфирования виброзащитных модулей ростового оборудования.

Монография предназначена для инженерно-технических и научных работников, занимающихся микро- и наноинженерией в электронном машиностроении и может быть рекомендована аспирантам вузов и студентам, обучающимся по специальности 210107 – «Электронное машиностроение» и направлению подготовки бакалавров и магистров 210100 – «Электроника и нанoeлектроника» профиля «Микро- и наноинженерия в электронике».

ISBN 978-5-905872-15-0

УДК 621.315 + 621.01/.03

© **Н.Н. Балан, В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков, 2013**

© Издательство НИИ предельных технологий, 2013

ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИВНОСИМОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ОТ МОДУЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБЪЕМЕ РОСТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

4.1. Энергетический баланс в зоне трения модулей перемещения ростового оборудования

В процессе трения в зоне контакта двух деталей происходит преобразование энергии. Подведенная энергия трения в виде работы сил трения преобразуется в другие виды энергии, такие, как энергия упругих и пластических деформаций, увеличение внутренней энергии в материале детали с учетом фазовых переходов. Также происходит теплопередача энергии вглубь материала, тепловое и электромагнитное излучение. Часть энергии расходуется на химические реакции и сорбционно-десорбционные процессы в зоне трения.

Материалы, используемые в зоне трения механизмов вакуумного оборудования, должны обладать минимальным газовыделением и пористостью, низким давлением паров, термо- и коррозионной стойкостью.

Энергия упругих деформаций

Схема формирования энергетического потока в зоне фрикционного контакта детали представлена на рис. 4.1.

При взаимодействии двух микронеровностей на площадках контакта возникают нормальные и тангенциальные напряжения. Выражения для энергии упругих деформаций в этом случае имеют вид:

Для нормальных деформаций

$$W_{\varepsilon} = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2} V_R = \frac{\sigma^2}{2E} V_R . \quad (4.1)$$

Для тангенциальных напряжений

$$W_{\tau} = \frac{\tau \cdot \gamma}{2} V_R = \frac{\tau^2}{2G} V_R . \quad (4.2)$$

Здесь σ , τ – значение нормальных и тангенциальных напряжений в зоне контакта соответственно, МПа;

ε , γ – относительные угловые и линейные деформации соответственно;

E , G – модули упругости 1-го и 2-го рода материалов контактирующих тел соответственно, МПа;

V_R – объем деформируемого материала, мм³.

В общем случае при наличии как нормальных, так и тангенциальных напряжений, относительно координатных осей X , Y , Z полная энергия упругих деформаций равна

$$W_{\varepsilon\gamma} = \int_0^{\varepsilon_x} \int_0^{\gamma_x} (\sigma_x d\varepsilon_x + \sigma_y d\varepsilon_y + \sigma_z d\varepsilon_z + \tau_x d\gamma_x + \tau_y d\gamma_y + \tau_z d\gamma_z) V_R . \quad (4.3)$$

Здесь σ_x , σ_y , σ_z , τ_x , τ_y , τ_z – составляющие тензоров нормального и тангенциального напряжений;

ε_x , ε_y , ε_z , γ_x , γ_y , γ_z – составляющие относительных и угловых деформаций единичной микронеровности, смоделированной в виде сегмента радиуса R (рис. 4.2).

Величина энергии упругих деформаций ввиду малости ε_x , ε_y , ε_z , γ_x , γ_y , γ_z незначительна.

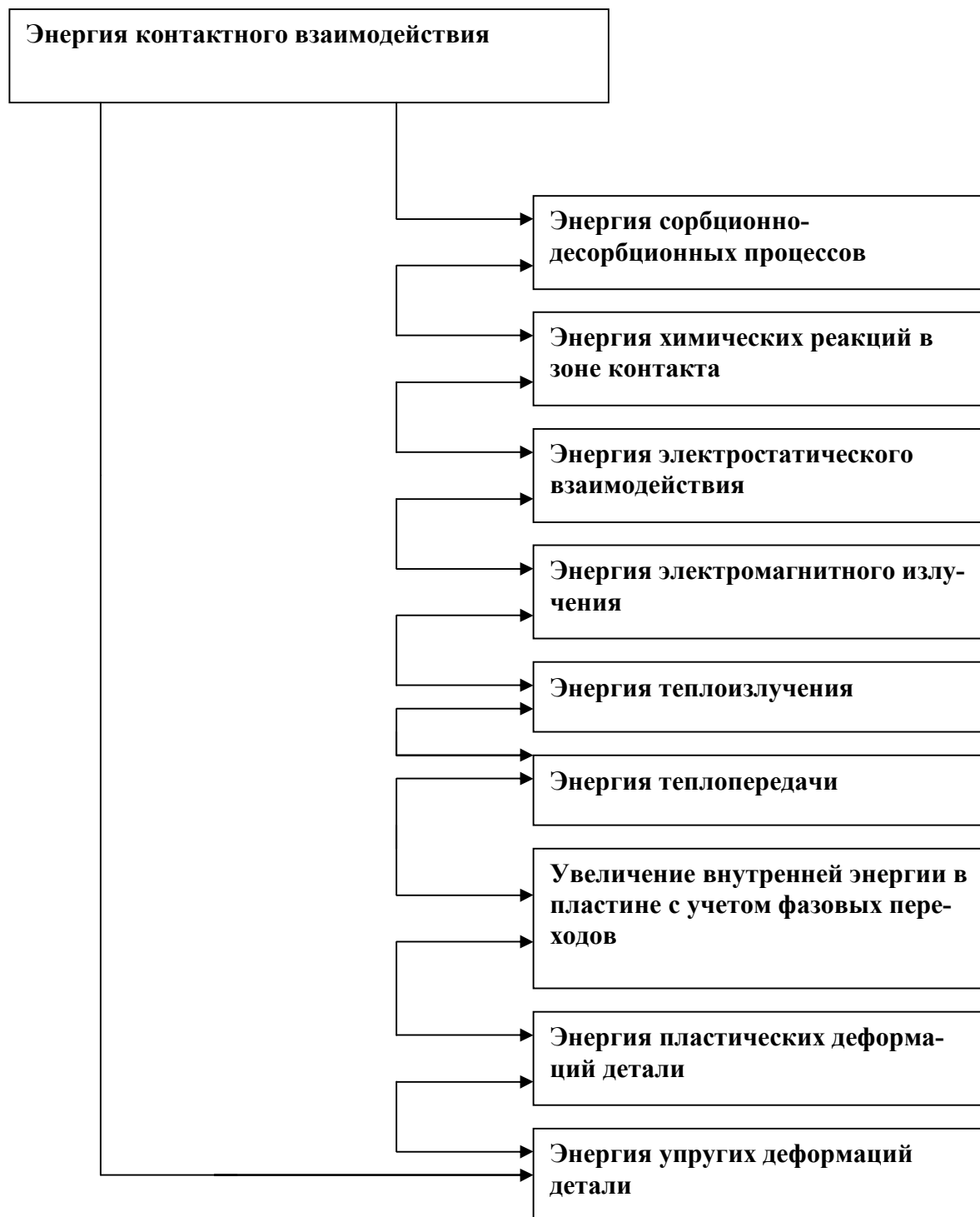


Рис.4.1. Схема формирования энергетического потока в зоне фрикционного контакта детали

Энергия пластических деформаций

Пластическую деформацию следует рассматривать как деформацию за пределами упругости. Энергия деформации может быть определена при наличии диаграммы напряжений и деформаций, полученных экспериментальным путём [158]:

$$W_{\varepsilon} = \int_0^{\varepsilon_{\theta}} \sigma \cdot V_R \cdot d\varepsilon \quad , \quad (4.4)$$

$$W_{\gamma} = \int_0^{\gamma_{\theta}} \tau V_R d\gamma \quad . \quad (4.5)$$

Если контактирующие поверхности полностью отделены одна от другой слоем твердой смазки или ТСП. В этом случае все процессы преобразования энергии протекают в вязко-упругом или пластическом промежуточном слое материала смазки с учетом релаксации материалов.

Увеличение внутренней энергии в твердом теле с учетом фазовых переходов

Увеличение внутренней энергии в твердом теле в интервале температур от T_1 до T_2 равно:

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} C_v \cdot m \cdot dT = \int_{T_1}^{T_2} C_v \cdot \rho \cdot V \cdot dT \quad . \quad (4.6)$$

Как видно из рис. 4.3, изменение внутренней энергии может происходить плавно и скачкообразно вследствие фазовых переходов. При этом следует иметь ввиду, что удельная теплоемкость C_v также зависит от температуры [159].

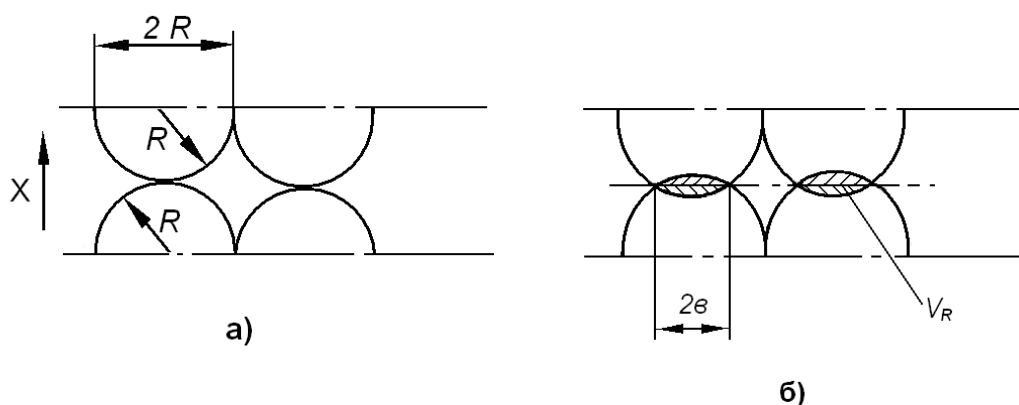


Рис. 4.2. Модель шероховатости реальной поверхности в виде сегментов радиуса R :
 а) до контактного взаимодействия;
 б) после контактного взаимодействия

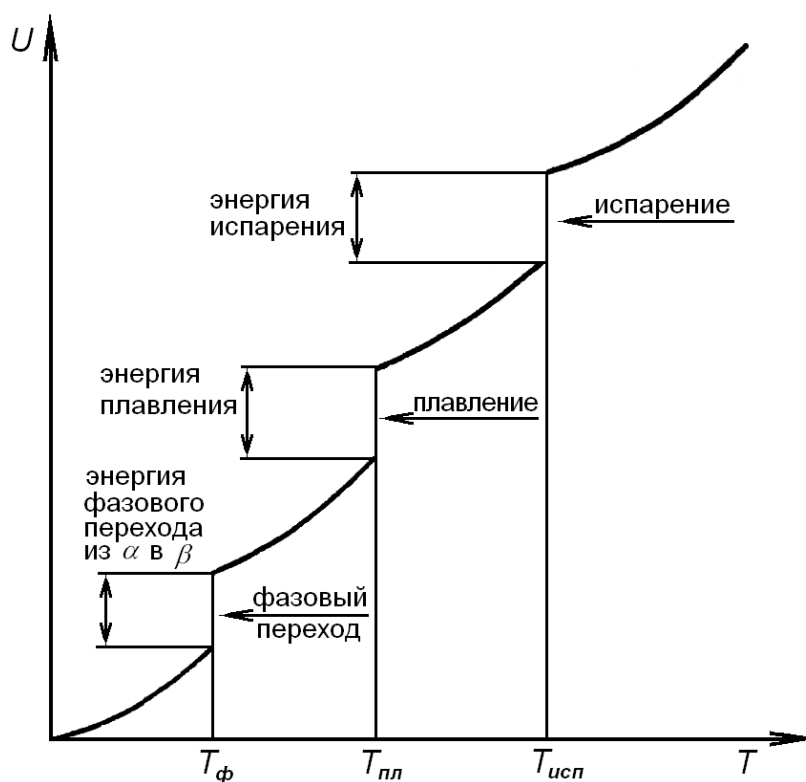


Рис.4.3. Изменение внутренней энергии кристаллического твердого тела с изменением абсолютной температуры:
 T_ϕ – температура фазового перехода из α в β ;
 $T_{пл}$ – температура плавления;
 $T_{исп}$ – температура испарения

Скачкообразное изменение внутренней энергии связано с фазовыми переходами, плавлением и испарением материала:

$$\Delta U_{\alpha \rightarrow \beta} = \int_{M_1}^{M_2} \lambda_{\alpha\beta} \cdot dm = \int_{v_1}^{v_2} \lambda_{\alpha\beta} \cdot \beta \cdot dv ; \quad (4.7)$$

$$\Delta U_{пл} = \int_{M_1}^{M_2} \lambda_{пл} \cdot dm = \int_{v_1}^{v_2} \lambda_{пл} \cdot \rho \cdot dv ; \quad (4.8)$$

$$\Delta U_{исп} = \int_{M_1}^{M_2} \lambda_{исп} \cdot dm = \int_{v_1}^{v_2} \lambda_{исп} \cdot \rho \cdot dv , \quad (4.9)$$

где $\lambda_{\alpha\beta}$, $\lambda_{пл}$, $\lambda_{исп}$ – удельные теплоты фазового перехода из α в β , плавления и испарения, соответственно;

β , m , v – плотность материала, масса и объем соответственно.

В общем случае, в соответствии с законом термодинамики изменение внутренней энергии будет равно

$$\Delta U = F + \Delta T \cdot S , \quad (4.10)$$

где F – свободная энергия, то есть та энергия, которую можно превратить в работу;

$\Delta T \cdot S$ – связанная энергия, то есть та энергия, которую нельзя превратить в работу, а только в тепло;

S –энтропия.

Энергия теплопередачи

Теплопередача с точки зрения физики проявляется двояко – в виде теплопроводности и конвекции.

Количество тепла, протекающее через поверхность контактирования пропорционально площади контакта, скорости изменения температуры в

направлении перпендикулярном площади контакта, и промежутку времени Δt :

$$\Delta\theta_{ТП} = K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \Delta t . \quad (4.11)$$

А при $\frac{dT}{dx} = const$ последнее выражение примет вид:

$$\Delta\theta_{ТП} = K \cdot A \frac{T_2 - T_1}{x} \Delta t , \quad (4.12)$$

если микронеровности смоделированы в виде цилиндров.

Здесь K – коэффициент теплопроводности;

A – площадь контакта;

$T_2 - T_1$ – перепад температур;

dT / dx – градиент температуры в направлении перпендикулярном площади контакта;

Δt – продолжительность процесса теплопередачи.

Энергия теплоизлучения

Теплоизлучение в виде электромагнитных волн с длиной волны $0,8 \div 400 \mu\text{м}$ осуществляется при помощи фотонов по закону Стефана-Больцмана [160]:

$$W_{изл} = C_s \cdot A \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \cdot \Delta t , \quad (4.13)$$

где C_s – коэффициент излучения абсолютно твердого тела;

A – площадь излучения;

Δt – продолжительность процесса излучения.

Энергия электромагнитного излучения

Работа сил трения может быть преобразована в электромагнитные

волны, например, световые ультрафиолетовые лучи гамма-излучение и др. Энергия электромагнитного излучения определяется выражением

$$W_{ЭМ} = \beta \cdot V_F \sum_{\nu_1}^{\nu_2} n_\nu h_\nu , \quad (4.14)$$

где β – коэффициент, учитывающий геометрию излучения и отражения от огибаемых волнами микронеровностей;

V – объем излучаемого материала микронеровности;

n_ν – пространственная плотность излучения (количество фотонов различной частоты в объеме излучаемого материала);

h_ν – энергия фотонов различной частоты;

ν_1, ν_2 – диапазон частот излучаемых материалом микронеровности.

Энергия электростатического взаимодействия

В результате интенсивного соприкосновения микронеровностей возникает электризация трением. В граничном слое в результате перехода зарядов создается дополнительный слой с определенным напряжением контакта. Общая энергия поля в упрощенном виде определяется исходя из уравнения

$$W_F = \frac{\beta_F}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} \cdot V_F . \quad (4.15)$$

Здесь β_F – коэффициент, учитывающий способ создания электрического потенциала;

\vec{E} – напряженность электрического поля;

\vec{D} – диэлектрическая плотность смещения;

V_F – объем, заполненный электрическим полем.

Энергия химических реакций в зоне трения

Повышенная склонность к вступлению в реакцию связана со снижением энергии активации, вследствие ослабления межмолекулярных связей в результате так называемой механической деструкции. При наличии соответствующих экспериментальных результатов энергию химических реакций можно определить, используя выражение

$$W_{xp} = \frac{\beta_{xp} \cdot E_{xp}}{JM} \cdot V_J, \quad (4.16)$$

где β_{xp} – коэффициент, учитывающий долю активизированного объема в объеме трения;

J – интенсивность износа;

E_{xp} – удельная энергия активации;

M – молекулярная масса;

V_J – объем изношенного материала.

Энергия сорбционно-десорбционных процессов

При наличии в зоне трения сорбционно-десорбционных процессов количество энергии рассчитывают с использованием следующего уравнения:

$$W_{cd} = \frac{\beta_{cd} \cdot E_{cd} \cdot \rho}{J \cdot M} V, \quad (4.17)$$

где β_{cd} – коэффициент, учитывающий долю сорбционно-десорбционного объема в общем объеме трения;

ρ – плотность материала;

E_{cd} – удельная энергия сорбции – десорбции.

Основные составляющие энергетического баланса

Современный уровень разработки проблемы по составлению энергетического баланса для процесса трения позволяет сделать вывод о том,

что основными составляющими работы сил трения, преобразованные в различные виды энергии, будут иметь превалирующее значение:

1. Энергия пластических деформаций.
2. Внутренняя энергия с учетом фазовых переходов.
3. Энергия теплопередачи.

С учетом сказанного и будем проводить дальнейшие рассуждения.

Исходя из молекулярно-механической теории [159] можно предположить, что работа сил трения равна

$$W_{TP} = W_{\text{мол}} + W_{\text{деф}} , \quad (4.18)$$

где $W_{\text{мол}}$ – работа, затраченная на разрыв молекулярных связей во фрикционном контакте;

$W_{\text{деф}}$ – работа, затраченная на деформирование единичных микронеровностей.

В соответствии с работой [162] можно принять, что

$$W_{\text{мол}} = P \frac{E_{\text{св}} \cdot n}{KЧ} ; \quad (4.19)$$

$$W_{\text{деф}} = \frac{1}{2} T \left(R - \sqrt{R^2 - \varrho^2} \right) , \quad (4.20)$$

где P – вероятность образования адгезионных связей в кристаллическом материале зависит от координационного числа кристаллической решетки КЧ и определяется:

$$P = P_1 P_2 = \frac{KЧ}{12} \cdot \frac{KЧ}{12} , \quad (4.21)$$

где:

n – число граничных атомов на площадке контакта;

$T = 4P_0 r^2$ – сила, действующая на единичную микронеровность;

R – радиус пятна контакта;

ϵ – удельное давление в контакте;

r – радиус основания сегмента.

Выражение (4.18) представляет собой работу сил трения за один цикл деформации единичной микронеровности, то есть при перемещении контактирующих тел друг относительно друга на расстоянии. При этом в зоне трения выделяется квант энергии. Тогда “количество квантов” равно

$$N = \frac{h}{2r} = \frac{V_{ск} \cdot \Delta t}{2r} . \quad (4.22)$$

Полагая, что вся эта энергия преобразуется в тепло, которое распространяется вглубь микронеровностей, можно записать:

$$W_{\Sigma Tp} = W_{tp} \cdot N = (W_{мол} + W_{деф}) \frac{V_{ск} \Delta t}{2r} = K \cdot A \frac{dT}{dx} \Delta t ; \quad (4.23)$$

$$\frac{dT}{dx} = \frac{W_{мол} + W_{деф}}{2rKS} V_{ск} . \quad (4.24)$$

Так как $S = \pi (R^2 - x^2)$, где x – текущая координата (рис. 4.4)

$$T = \int_{\sqrt{R^2 + \epsilon^2}}^R \frac{W_{мол} + W_{деф}}{2r \cdot K \cdot \pi (R^2 - x^2)} V_{ск} dx + T_0 . \quad (4.25)$$

Производя интегрирование последнего выражения, получим:

$$T = \frac{W_{мол} + W_{деф}}{2\pi rKR} V_{ск} \ln \frac{1 + \frac{R - \sqrt{R^2 - \epsilon^2}}{R}}{1 - \frac{R - \sqrt{R^2 - \epsilon^2}}{R}} + T_0 , \quad (4.26)$$

где T_0 – начальная температура контактирующих материалов.

При $\epsilon = 0$; $T = T_0$.

При $\epsilon \neq 0$;

$$T = \frac{W_{\text{мол}} + W_{\text{деф}}}{2\pi KrR} V_{\text{ск}} \ln \frac{2R - \sqrt{R^2 - e^2}}{\sqrt{R^2 - e^2}} + T_0 . \quad (4.27)$$

Разложим $\ln \frac{2R - \sqrt{R^2 - e^2}}{\sqrt{R^2 - e^2}}$, входящий в последнее выражение, в ряд

Маклорена и, ограничив его первым членом, окончательно получим выражение для температуры на поверхности трения, которое позволит теоретически определить температурный режим в любом узле сухого трения.

$$T = \frac{W_{\text{мол}} + W_{\text{деф}} \left(R - \sqrt{R^2 - e^2} \right)}{\pi K r R^2} V_{\text{ск}} + T_0 . \quad (4.28)$$

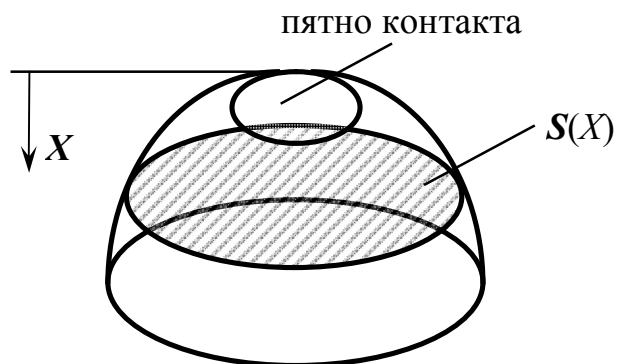
Последнее уравнение является начальным условием для решения уравнения теплопроводности.

Рассмотрим однородную полусферу, теплоизолированную с боков. Контактное пятно будем считать достаточно большим, чтобы в любой момент времени температуру во всех точках поперечного сечения можно было считать одинаковой.

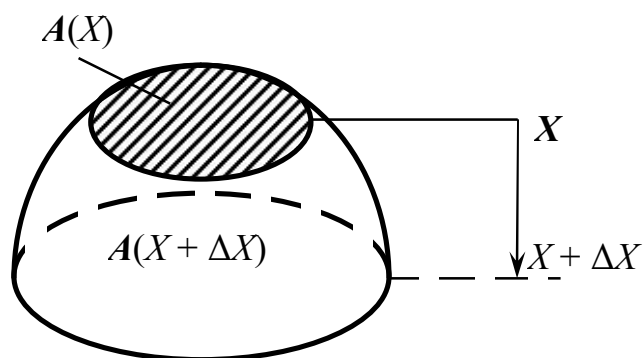
Величина теплового потока считается положительной, если тепло течет в сторону возрастания «X». Рассмотрим процесс распространения температуры в полусфере с достаточно большим контактным пятном. Этот процесс описывается функцией $U(x,t)$, представляющей температуру в сечении x в момент времени t .

Физические закономерности

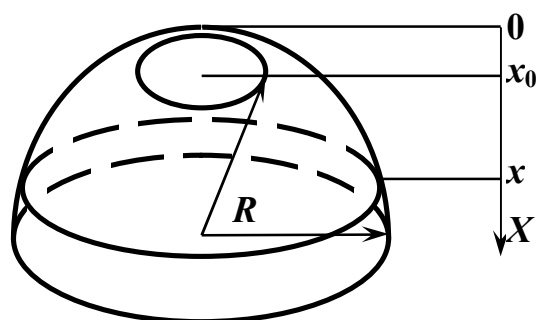
1. Закон Фурье. Если температура тела неравномерна, то в нем возникают тепловые потоки, направленные из мест с более высокой темпе-



а



б



в

Рис.4.4. Схема формирования пятна контакта

ратурой в места с более низкой температурой.

Количество тепла, протекающее через сечение $A(x)$ за промежуток $(t, t + \Delta t)$ равно

$$\Delta\theta = -K \cdot A \frac{dU}{dx} \Delta t, \quad (4.29)$$

где K – коэффициент теплопроводности.

2. Количество тепла, необходимое для нагревания однородного тела, чтобы его температура повысилась на ΔU , равно

$$\Delta\theta = c \cdot m \cdot \Delta U = c \cdot \rho \cdot V \cdot \Delta U, \quad (4.30)$$

где c – удельная теплоемкость;

m – масса;

ρ – его плотность;

V – объем.

Выделим участок полусферы, ограниченный поперечными сечениями $A(x)$ и $A(x + \Delta x)$ с абсциссами x и $x + \Delta x$ соответственно.

Составим уравнение теплового баланса:

$$\Delta\theta(x) = -K \cdot A(x) \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \Delta t, \quad (4.31)$$

где $\Delta\theta(x)$ – количество тепла, входящее через поперечное сечение за промежуток времени Δt .

$$\Delta\theta(x + \Delta x) = -K \cdot A(x + \Delta x) \frac{\partial U(x + \Delta x, t)}{\partial x} \Delta t, \quad (4.32)$$

где $\Delta\theta(x + \Delta x)$ – количество тепла, входящее через поперечное сечение через промежуток времени Δt .

Количество тепла, сообщенного рассмотренному (см. рис. 4.4) участку полусферы за время Δt равно:

$$\begin{aligned}
\Delta\theta &= \Delta\theta(x) - \Delta\theta(x + \Delta x) = \\
&= -K \cdot A(x) \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \Delta t + K \cdot A(x + \Delta x) \frac{\partial U(x + \Delta x, t)}{\partial x} \Delta t = \quad (4.33) \\
&= -K \cdot A(x) \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \Delta t + K \left[A(x) + A'(x)\Delta x + o(\Delta x)^2 \right] \left[\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} \Delta x + o(\Delta x)^2 \right] \Delta t = \\
&= K \cdot A(x) \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} \Delta x \cdot \Delta t + K \cdot A'(x) \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \Delta x \cdot \Delta t + o(\Delta x^2).
\end{aligned}$$

Из (4.33) получаем $\Delta\theta$ с точностью до бесконечно малых величин высшего порядка в виде

$$\Delta\theta = K \cdot A(x) \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} \Delta x \cdot \Delta t + \frac{A'(x) \cdot A(x)}{A(x)} \cdot \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \Delta x \cdot \Delta t. \quad (4.34)$$

С другой стороны, количество тепла сообщенное телу составляет

$$\Delta\theta = c \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \Delta t \frac{\partial U}{\partial t}. \quad (4.35)$$

Приравниваем (4.34) и (4.35) и получаем:

$$K \left(\frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} + \frac{A'(x)}{A(x)} \cdot \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} = c \cdot \rho \frac{\partial U}{\partial t} \right).$$

Обозначим через $a^2 = k / (c\rho)$ и получим уравнение теплопроводности в виде:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} + a^2 \frac{A'(x)}{A(x)} \cdot \frac{\partial U(x, t)}{\partial x}. \quad (4.36)$$

Запишем $A(x)$ в явном виде:

$$A(x) = \pi \left(\sqrt{R^2 - (R - x)^2} \right)^2 = \pi \cdot x(2R - x);$$

$$A'(x) = 2\pi(R - x);$$

$$\frac{A'(x)}{A(x)} = \frac{2(R - x)}{x(2R - x)}.$$

В этом случае уравнение (4.36) примет вид:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U(x, t)}{\partial x^2} + a^2 \frac{2(R - x)}{x(2R - x)} \cdot \frac{\partial U(x, t)}{\partial x}. \quad (4.37)$$

При $x \ll R$ имеем:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} \right). \quad (4.38)$$

Применим к решению последнего уравнения метод Фурье, полагая, что

$$U(x, t) = X(x) \cdot T(t).$$

Тогда
$$\frac{T'(t)}{a^2 T(t)} = \frac{X''(x) + \frac{1}{x} X'(x)}{X(x)} = -\lambda^2.$$

Отсюда
$$T(t) = ce^{-\lambda^2 a^2 t}; \quad (4.39)$$

$$X''(x) + \frac{1}{x} X'(x) + \lambda^2 X(x) = 0. \quad (4.40)$$

Для функции $X(x)$ получаем уравнение, одно частное решение которого выражается через функцию Бесселя нулевого порядка:

$$X(x) = J_0(\lambda, x).$$

Второе линейно независимое решение уравнения (4.40) – функцию Неймана N_0 – мы не принимаем в расчет, так как она обращается в бесконечность при $x = 0$.

Чтобы решение удовлетворяло однородному краевому условию, нужно положить $J_0(\lambda, R) = 0$.

Таким образом, собственными числами задачи являются величины

$\lambda_k = \frac{\mu_k}{R}$, где μ_k – корни функции Бесселя нулевого порядка:

$$\mu_1 = 2,4; \mu_2 = 6,52; \mu_3 = 8,65; \mu_4 = 11,79.$$

Каждому собственному числу μ_k соответствует собственная функция

$$U_k(x, t) = e^{-\lambda_k^2 a^2 t} \cdot J_0(\lambda_k x),$$

а в общем случае :

$$U(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\lambda_k^2 a^2 t} \cdot J_0(\lambda_k x),$$

или

$$U(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} e^{-\frac{\mu_k}{R} a^2 t} \cdot J_0\left(\frac{\mu_k}{R} x\right).$$

В практических расчетах в основном используется только первых два корня μ_1 и μ_2 .

Полученные результаты могут быть использованы при расчетах пределов выносливости материалов и допускаемых напряжений по роду нагрузки, что обеспечит наилучшие качества деталей и узлов вакуумного технологического оборудования.

4.2. Модели трения и износа в условиях технологических вибраций

Рассмотрим несколько моделей сухого трения в вакууме – механическую, адгезионную и адгезионно-механическую. Каждая из них в той или иной степени удовлетворяет конкретным условиям эксплуатации. Все они учитывают наличие колебательного процесса при контактном взаимодействии микронеровностей.

Механическая модель сухого трения

При сухом трении на поверхностях контактирующих тел присутствуют окислы, адсорбированные молекулы и смазки, контакт ювенильных поверхностей отсутствует, поэтому коэффициент трения может быть определен зависимостью [159]:

$$f = \frac{F_{см}}{T}, \quad (4.41)$$

где $F_{см}$ – силы смятия во фрикционном контакте;

T – нагрузка, действующая на одну микронеровность.

Нагрузка T состоит из двух составляющих $T = T_c + T_d$,

где $T_c = 4\rho r^2 = 4\rho R_{\max}(2R - R_{\max})$ – статическая, а $T_d = m\gamma$ – динамическая составляющие.

Нагрузка, действующая на одну микронеровность определяется на основании теоретических выкладок, приведенных в [159]:

$$T = 4\rho r^2 = 4\rho R_{\max}(2R - R_{\max}) + m\gamma; \quad (4.42)$$

$$F_{см} = \sigma_{см} \cdot b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right), \quad (4.43)$$

где $\sigma_{см}$ – напряжение смятия для более мягкого материала в контакте;

ρ – удельное давление в контакте;

b – радиус пятна контакта;

R, R_{\max} – радиус и высота единичной микронеровности.

$$\text{Тогда } f = \frac{\sigma_{см} b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{4\rho R_{\max} (2R - R_{\max}) + m\gamma}. \quad (4.44)$$

Рассмотрим два случая контактного взаимодействия

Случай 1. Упругое контактное взаимодействие, $\sigma_{см} \leq \sigma_{-1}$.

В соответствии с работой [8]:

$$b = 0,88 \sqrt[3]{\frac{I}{2} \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) R}, \quad (4.45)$$

где E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов.

С учетом выражения (4.42)

$$b = 0,7 \sqrt[3]{[4\rho R_{\max} (2R - R_{\max}) + m\gamma] \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) R}. \quad (4.46)$$

Предел применимости последней формулы определяется из соотношения:

$$\sigma_H = \frac{1,5T}{\pi b^2} \leq \sigma_{нр},$$

где σ_H – контактное напряжение;

$\sigma_{нр}$ – допустимое контактное напряжение.

Случай 2. Пластическое контактное взаимодействие, $\sigma_{см} \leq \sigma_{\sigma}$.

Величина пятна контакта находится из следующих соображений:

$$\sigma_{\sigma} = H_{\mu};$$

$$\frac{1,5T}{\pi b^2} = H_{\mu};$$

откуда

$$b = 1,384 \sqrt{\frac{\rho R_{\max} (2R - R_{\max})}{H_{\mu}}}, \quad (4.47)$$

где σ_{σ} – предел прочности материала микронеровности;

H_{μ} – микротвердость.

Адгезионная модель трения металлических материалов

Адгезионная модель трения лежит в основе многих теоретических работ, направленных на определение расчетного значения коэффициента трения.

В ряде работ полученные формулы связывают коэффициент трения лишь с механическими характеристиками тел, что явно недостаточно, и в целом ограничивает раскрытие адгезионного взаимодействия двух контактирующих поверхностей. Была предпринята попытка связать величину коэффициента трения с некоторыми физическими свойствами твердых тел. При этом рассматривалось контактное взаимодействие чистых поверхностей тел, не содержащих окисных пленок.

На основании адгезионной модели контактного взаимодействия получены расчетные формулы для определения коэффициента трения одноименных пар металлов в зависимости от их кристаллической структуры, энергии связи и температуры плавления или сублимации в интервале температур от 0 K до $T_{пл}$ или $T_{сб}$, [195]:

$$f = \frac{\alpha(E_{св}^0 - 3K_B T)}{K_B(T_{пл} - T)}, \quad (4.48)$$

$$f = \frac{\alpha(E_{св}^0 - 3K_B T)}{K_B(T_{сб} - T)}, \quad (4.49)$$

где α – коэффициент, зависящий от типа кристаллической решетки;

$E_{св}^0$ – энергия связи атома в кристаллической решетке, при $T=297$ КДж;

K_B – постоянная Больцмана, $K_B = 1,38 \cdot 10^{-3}$ Дж/град;

$T_{пл}$, $T_{сб}$ – соответственно температуры плавления и сублимации, К;

T – температура в зоне контакта, К.

Вероятность образования адгезионных связей зависит от координационного числа кристаллической решетки $KЧ$. Максимальное $KЧ=12$, им обладают металлы с $ГЦК$ – решеткой. Вероятность образования адгезионных связей для металлов с $ГЦК$ – решеткой принята равной 1.

Для других структур вероятность образования адгезионных связей может быть представлена в виде

$$P = \frac{KЧ}{12}. \quad (4.50)$$

Вероятность образования связей при контакте двух одноименных тел будет равна произведению вероятностей образования связей для каждой из структур:

$$P = P_1 \cdot P_2. \quad (4.51)$$

Процесс сухого трения в вакууме при контактном взаимодействии можно представить как цепь последовательных актов адгезионного схватывания и следующего за ним разрушения, происходящих на поверхностях единичных пятен контакта, в результате образования активных центров, нарушающих стабильность атомов.

Следует отметить, что при работе без смазки в условиях вакуума, на

процесс трения наибольшее влияние оказывает адгезионная составляющая силы трения $F_{адг.}$, в то время, как механической составляющей, ввиду её малости, можно пренебречь.

Адгезионную составляющую силы трения определим по формуле

$$F_{адг.} = P \frac{E_{св} \cdot n}{KЧd}, \quad (4.52)$$

где P – вероятность образования адгезионных связей;

$E_{св}$ – энергия связи;

n – число граничных атомов на площадке контакта;

$KЧ$ – координационное число для кристаллической структуры, находящейся в контакте;

d – расстояние между ближайшими “соседями” в кристаллической решетке.

Среднее число атомов n на площадке контакта определим как

$$n = \frac{2A_B}{\pi S_B} = \frac{2b^2}{S_B}, \quad (4.53)$$

где A_B – величина площадки контакта;

S_B – площадь элементарного базиса, зависящая от кристаллической структуры металла.

Площадь элементарного базиса S_B для различных кристаллических структур будет различной.

Например, для решетки типа *ОЦК* площадь элементарного базиса равна площади грани кристалла, то есть $S_B = a^2$.

Для решетки типа *ГЦК* $S_B = a^2 / 4$, т.е. четвертая часть грани кристалла,

а для *ГПУ* – решетки S_B может принимать различные значения $S_B = \frac{\sqrt{3}}{4} a^2$

и $S_B = ac$ в зависимости от плоскости кристалла, относительно которой рассматриваем скольжение двух контактирующих поверхностей.

Окончательно формула для определения коэффициента трения примет следующий вид:

$$f = \frac{F_{адг.}}{T} = \frac{2\rho E_{св} \cdot b^2}{KЧS_B \cdot d[4\rho R_{max}(2R - R_{max}) + my]} \cdot \quad (4.54)$$

Авторами были проведены расчеты коэффициентов трения для одноименных пар трения, при комнатной температуре в вакууме и при удельном давлении в контакте $\rho = 0,1$ и $0,2$ Н/мм².

В этом случае, при упругом контактировании двух микронеровностей, где высота микронеровности R_{max} равна радиусу R , формула (4.54) будет выглядеть в следующем виде:

$$f = \frac{2\rho E_{св} \cdot b^2}{KЧ \cdot S_B \cdot d (4\rho R_{max}^2 + my)} \cdot \quad (4.55)$$

Адгезионно-механическая модель трения металлических материалов

Анализ многочисленных экспериментальных данных по трению твердых тел в условиях вакуума показывает, что в общем случае коэффициент трения материалов определяется зависимостью вида:

$$f = \frac{F_{адг} + F_{деф}}{T}, \quad (4.56)$$

где $F_{адг}$ – сила адгезионного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте;

$F_{деф}$ – сила деформационного взаимодействия микронеровностей во фрикционном контакте.

Адгезионная составляющая общей силы трения будет зависеть от размера площадки контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбированного газа.

В предыдущей модели не учитывалось влияние окружающей газовой

среды, а рассматривалось контактное взаимодействие чистых поверхностей твердых тел, лишенных каких-либо окисных или адсорбированных пленок. Если учитывать влияние окружающей среды, то среднее число атомов n на площадке будет определяться выражением

$$n = \frac{2A_{юв}}{\pi S_B}, \quad (4.57)$$

где $A_{юв}$ – величина площадки контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбированного газа.

Что касается величины площадки контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбированного газа, то она может быть определена из следующих соображений.

Рассмотрим случай, когда в вакуумной камере имеется некоторое остаточное давление. Известно, что с учетом вероятности осаждения молекул на чистой поверхности, время T , в течение которого происходит образование монослоя молекул на поверхности тела, определяется по графику (рис. 4.5) [197].

Естественно предположить, что в момент фрикционного контактного взаимодействия, на поверхности контакта не происходит осаждение молекул.

Осаждение молекул происходит в течение некоторого времени t между контактами микронеровностей, то есть за время, в течение которого происходит перемещение фрикционного контакта с одних пар микронеровностей на другие. Время t можно также охарактеризовать как время паузы:

$$t = \frac{S}{v}, \quad (4.58)$$

где S – путь, пройденный микронеровностью до следующего контактного взаимодействия

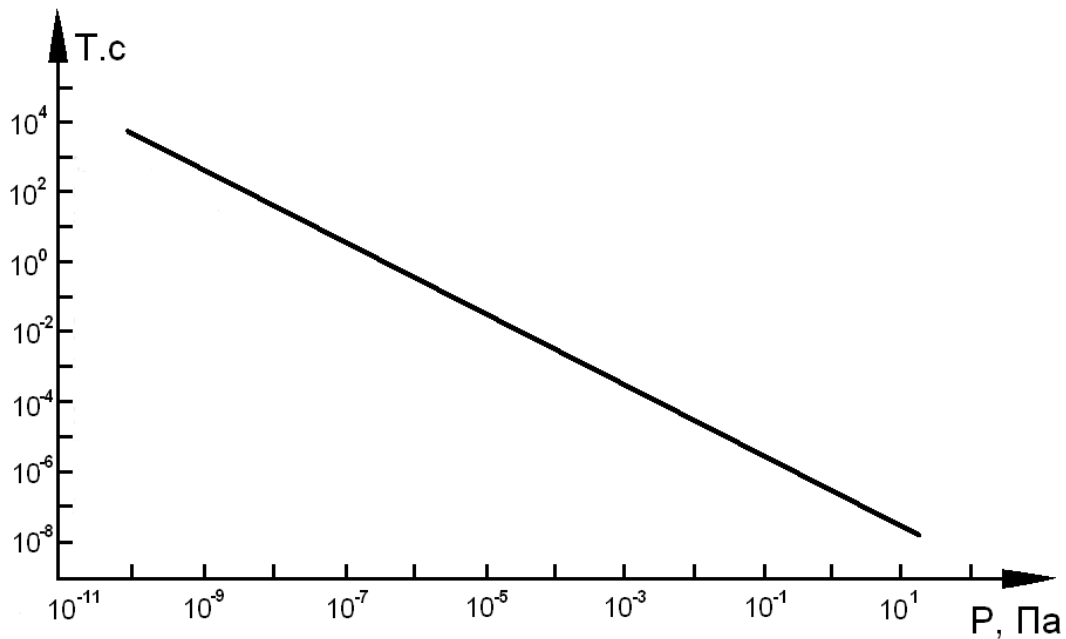


Рис.4.5. Время образования монослоя молекул воздуха на поверхности трения в зависимости от остаточного давления в вакуумной камере

$$S = 2(r - b), \quad (4.59)$$

v – скорость скольжения во фрикционном контакте.

Если $t = T$, то на поверхности фрикционного контакта образуется монослой молекул воздуха.

Если $t > T$, то на поверхности фрикционного контакта образуется полислой молекул воздуха.

Если $t < T$, то поверхность контакта покрывается лишь частично молекулами воздуха. А всю площадь контактного взаимодействия A_B можно условно разделить на две:

$$A_B = A_{адс} + A_{юв}, \quad (4.60)$$

где $A_{адс}$ – площадь единичного пятна покрытия адсорбированными молекулами;

$A_{юв}$ – ювенильная площадь контактного взаимодействия.

В зависимости от величины остаточного давления в вакуумной камере соотношение между $A_{адс}$ и $A_{юв}$ будет различным.

Адгезионное взаимодействие происходит лишь на площадке $A_{юв}$.

Введём параметр

$$K = \frac{t}{T} = \frac{A_{адс}}{A_{адс} + A_{юв}}, \quad (4.61)$$

или

$$K = \frac{A_в - A_{юв}}{A_в} = 1 - \frac{A_{юв}}{A_в}. \quad (4.62)$$

Откуда

$$\frac{A_{юв}}{A_в} = 1 - K, \quad A_{юв} = A_в(1 - K). \quad (4.63)$$

Тогда среднее число атомов n на площадке контакта, которые еще не закрыты монослоем молекул воздуха будет равно:

$$n = \frac{2A_в(1 - K)}{\pi S_в}. \quad (4.64)$$

А сила адгезионного взаимодействия двух микронеровностей равна

$$F_{адз} = \frac{P \cdot E_{св} \cdot n}{KЧ \cdot d} = \frac{2PE_{св}A_в(1 - K)}{\pi \cdot KЧ \cdot S_в \cdot d}. \quad (4.65)$$

Сила деформационного взаимодействия равна

$$F_{деф} = \sigma_{см} b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right).$$

Суммарный коэффициент трения равен

$$f = \frac{b}{4\rho R_{\max}(2R - R_{\max}) + m\gamma} \left[\frac{2PE_{св} b(1 - K)}{KЧ \cdot S_в \cdot d} + \sigma_{см} \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) \right]. \quad (4.66)$$

При $K = 1$ имеет место только механическое трение.

Рассмотренные модели трения могут быть использованы для расчета

коэффициентов трения узлов исполнительных устройств.

Окончательный выбор материалов пар трения следует производить после экспериментальной проверки полученных теоретических зависимостей.

С позиции долговечности того или иного элемента исполнительного устройства целесообразно знать значение величины интенсивности изнашивания.

Рассмотрим две модели изнашивания материалов: усталостную и адгезионно–усталостную.

Усталостная модель изнашивания металлических материалов.

Проблема повышения работоспособности исполнительных устройств связана с уменьшением интенсивности изнашивания контактирующих материалов, которая зависит от многих внешних и внутренних факторов. К ним относятся: нагрузка, скорость скольжения, шероховатость поверхности, механические и адгезионные свойства контактирующих материалов, а также физико-химические явления, происходящие в поверхностных слоях двух материалов.

При оценке интенсивности изнашивания приняты следующие допущения:

1. Изнашивание происходит в зоне вершин микронеровностей в результате контактной усталости материала.
2. Адгезионные свойства поверхностных слоев не учитываются.

Поскольку изнашиваемый материал (в данной модели) удаляется лишь с реальных пятен касания (см. рис. 4.4), введем понятие удельной интенсивности износа:

$$i = \frac{\Delta h_1}{l}, \quad (4.67)$$

где Δh_1 – средняя толщина изношенного слоя пятна контакта;

$l = 2b$ – путь трения, равный диаметру пятна контакта.

Если предположить, что изнашивание происходит равномерно, то установившийся процесс отделения материала на всем пути трения будет равен средней линейной интенсивности изнашивания за одно нарушение фрикционной связи:

$$J_h = i \frac{A_B}{A_r}, \quad (4.68)$$

где $A_B = \pi b^2$ и $A_r = 4r^2$ – фактическая и номинальная площадь контакта.

Средняя толщина изношенного слоя поверхности за одно нарушение фрикционной связи:

$$\Delta h = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{N}, \quad (4.69)$$

где N – число циклов деформаций до разрушения.

Естественно предположить, что число циклов деформаций, приводящих к разрушению, зависит от напряженного состояния единичного пятна контакта и характера физико-механических процессов, протекающих в контакте. Если напряжение в контакте превышает допустимое, то

$$N = 10^7 \left(\frac{\sigma_{HP}}{\sigma_{\mathcal{E}}} \right)^6, \quad (4.70)$$

где σ_{HP} и $\sigma_{\mathcal{E}}$ – допускаемое и расчетное эквивалентные напряжения в контакте.

При $\sigma_{\mathcal{E}} = \sqrt{\sigma_H^2 + 4\tau^2}$ и полагая, что $\tau = f\sigma_H$, где f – коэффициент трения скольжения в контакте, получим:

$$\sigma_{\mathcal{E}} = \sigma_H \sqrt{1 + 4f^2}; \quad (4.71)$$

$$\sigma_H = \frac{1,5T}{\pi b^2}.$$

После соответствующих постановок в (4.68) выражений (4.69), (4.70), (4.71) формула для расчета средней линейной интенсивности изнашивания примет вид:

$$J_h = \frac{\pi}{8} 10^{-7} \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1+4f^2}}{\sigma_{нр}} \right)^6 \frac{b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{R_{\max} (2R - R_{\max})}. \quad (4.72)$$

Полученная теоретическая формула позволяет определять интенсивность изнашивания материалов в зависимости от давления на площадке контакта, контактных напряжений, коэффициента трения и модуля упругости 1-го рода.

Определим интенсивность изнашивания в зависимости от числа циклов деформации.

Число циклов деформации при известной микрогеометрии поверхности трения определяется по формуле:

$$N_C = \frac{v \cdot t}{2\sqrt{R_{\max} (2R - R_{\max})}}, \quad (4.73)$$

где v – скорость скольжения, мм/с;

t – время движения, с.

Тогда толщина слоя материала, изношенного за N_u циклов равна

$$\Delta h_u = \Delta h_1 \cdot N_u, \text{ или } \Delta h_u = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{N} \cdot N_u. \quad (4.74)$$

При определении удельной интенсивности изнашивания в функции времени учитывалось следующее:

1. Площадь контакта по мере изнашивания возрастает, а контактные напряжения уменьшаются.

2. Количество циклов деформации N , приводящих к разрушению, с увеличением площади пятна контакта возрастает.

3. Процесс изменения удельной интенсивности изнашивания начинает проявляться, когда площадь изношенной поверхности становится равной или большей площади пятна контакта, т.е. при $N_y \geq N$.

На основании принятых допущений можно записать, что удельная интенсивность изнашивания при $N_y \geq N$, будет равна

$$i_y = \frac{\Delta h_y}{2b_y N} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2b_y N}, \quad (4.75)$$

где

$$b_y = \sqrt{R^2 - (R - \Delta h_1 N_y)^2}. \quad (4.76)$$

Окончательно, с учетом выражения (4.68) формула для интенсивности изнашивания примет вид:

$$\begin{aligned} J_{ny} = i_y \frac{A_B}{A_r} &= \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2\sqrt{R^2 - (R - \Delta h_1 N_y)^2} \cdot N} \cdot \frac{\pi b^2}{4R_{\max}(2R - R_{\max})} = \\ &= \frac{\pi b^2 (R - \sqrt{R^2 - b^2})}{8N R_{\max} (2R - R_{\max}) \sqrt{R^2 - (R - \Delta h_1 N_y)^2}}. \end{aligned} \quad (4.77)$$

Адгезионно-усталостная модель изнашивания металлических материалов

При оценке интенсивности изнашивания примем следующие допущения:

1. Изнашивание происходит в зоне вершин микронеровностей в результате адгезионного взаимодействия и контактной усталости.

2. За одно фрикционное взаимодействие на площадке контакта, на которой полностью отсутствует слой молекул адсорбционного газа,

происходит удаление материала толщиной, равной величине внедрения:

$$\Delta h_1 = R - \sqrt{R^2 - b^2} . \quad (4.78)$$

Полная интенсивность изнашивания равна

$$J_{пол} = J_{адг} + J_{уст} , \quad (4.79)$$

где

$$J_{адг} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2b} \cdot \frac{A_{юв}}{A_r} , \quad (4.80)$$

$$J_{уст} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2bN} \cdot \frac{A_{адс}}{A_r} ; \quad (4.81)$$

$$J_{пол} = \frac{R - \sqrt{R^2 - b^2}}{2b} \left(1 - K + \frac{K}{N} \right) \cdot \frac{A_B}{A_r} . \quad (4.82)$$

При $K = 1$, имеет место чисто усталостное изнашивание.

При $K = 0$ – адгезионное.

Зная величину интенсивности изнашивания $J_{пол}$, можно определить толщину изношенного слоя $\Delta h = J_{пол} L_{\Sigma}$, где L_{Σ} – суммарный путь трения, определяемый по формуле

$$L_{\Sigma} + L + L_{дон}, \quad (4.83)$$

где:

$L = v_{сх} \cdot t$ – путь трения, без учета колебательного процесса;

$v_{сх}$ – скорость скольжения;

t – время процесса трения в исполнительном устройстве;

$L_{дон} = 4 A \omega_R t$ – дополнительный путь трения, вызванный наличием колебательного процесса в исполнительном устройстве;

A – среднее значение амплитуды колебаний;

ω_R – собственная частота колебаний исполнительного устройства.

4.3. Расчет элементов модулей перемещения на привносимый уровень загрязнений в технологический агрегат

Общие расчетные зависимости

Радиус фрикционного пятна контакта при упругом контакте определяется по формуле

$$b = 0,7 \sqrt[3]{4 \cdot p \cdot R \cdot R_{\max} (2R - R_{\max}) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}, \text{ мм}, \quad (4.84)$$

где p – удельное давление в контакте, Н/мм² ;

R, R_{\max} – параметры шероховатости поверхностей, мм;

E_1, E_2 – модули упругости контактирующих материалов, Н/мм².

Величина контактных напряжений σ_H , которые не должны превышать допускаемых σ_{HP} :

$$\sigma_H = \frac{6 \cdot p \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{\pi b^2} \leq \sigma_{HP}, \text{ Н/мм}^2. \quad (4.85)$$

Примечание: Если условие (4.85) не выполняется, то радиус фрикционного пятна контакта b определяется из условия пластического контактного взаимодействия.

Радиус фрикционного пятна контакта при пластическом контактном взаимодействии определяется по формуле:

$$b = \sqrt{\frac{p \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{H_\mu}}, \text{ мм}, \quad (4.86)$$

где H_μ – микротвердость.

Примечание: При контактном взаимодействии двух различных материалов в расчет принимается меньшая микротвердость.

Средняя линейная интенсивность изнашивания определяется по формуле:

$$J_h = \frac{\pi}{8} \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4 \cdot f^2}}{\sigma_{HP}} \right)^6 \cdot \frac{b \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{R_{\max} (2R - R_{\max})}, \quad (4.87)$$

где f – коэффициент трения.

Средний объем изношенной частицы:

$$W = \frac{\pi}{2} \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) \cdot \left[b^2 + \frac{\left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)}{3} \right], \text{ мм}^3. \quad (4.88)$$

Среднее количество частиц износа, выделяемых из узла трения механизма в единицу времени:

$$N = \frac{J_h \cdot v_{ск} \cdot S_n}{W}, \quad 1/\text{с}, \quad (4.89)$$

где $v_{ск}$ – скорость скольжения во фрикционном контакте, мм/с;

S_n – номинальная площадь поверхности трения, мм².

Минимальное количество частиц износа:

$$N_{\min} = N \frac{2b}{L_k}, \quad 1/\text{с}, \quad (4.90)$$

где L_k – контурный путь трения, мм.

Максимальный объем изношенной частицы:

$$W_{\max} = W \frac{L_k}{2b}, \quad \text{мм}^3. \quad (4.91)$$

Максимальный размер изношенной частицы рассчитывается по формуле

$$B_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot W_{\max}}{\pi}}, \text{ мм.} \quad (4.92)$$

При расчете количества частиц износа необходимо знать численное значение удельного давления в контакте p , скорости скольжения $v_{ск}$, номинальной площади поверхности трения S_H , контурного пути трения L_k , для конкретных узлов трения внутрикамерных механизмов: передач винт-гайка, передач винт-гайка несоосная, передач винт-гайка волновая.

Расчетные зависимости для передачи винт-гайка

Удельное давление в контакте винт-гайка определяется по формуле:

$$p = \frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot m (d^2 - d_1^2)}, \text{ Н/мм}^2, \quad (4.93)$$

где F_a – осевая нагрузка на винте, Н;

m – расчетное число витков, как правило $m=6$;

d – наружный диаметр резьбы, мм;

d_1 – внутренний диаметр резьбы, мм.

Скорость скольжения в контакте винт-гайка:

$$v_{ск} = \frac{\pi \cdot n \cdot d_2}{60 \cdot \cos \lambda}, \text{ мм/с}, \quad (4.94)$$

где n – частота вращения винта, об/мин;

d_2 – средний диаметр резьбы, мм;

λ – угол подъема нарезки резьбы.

Номинальная площадь поверхности трения S_H :

$$S_H = \pi \cdot d_2 \cdot m \left(\frac{d - d_1}{2 \cos \beta} \right), \text{ мм}^2, \quad (4.95)$$

где β – угол профиля резьбы.

Контурный путь трения для передачи винт-гайка:

$$L_k = \pi \cdot d , \text{ мм.} \quad (4.96)$$

Расчетные зависимости для передачи винт-гайка несоосная

Удельное давление в контакте винт–гайка несоосная определяется по формуле:

$$p = \frac{4F_a}{\pi \cdot m (d^2 - d_1^2) z} , \text{ Н/мм}^2 , \quad (4.97)$$

где z – коэффициент взаимного перекрытия.

Скорость скольжения в контакте винт–гайка несоосная:

$$v_{ск} = \frac{v_{oc}}{\sin \beta} , \text{ мм/с,} \quad (4.98)$$

где v_{oc} — скорость выходного звена, мм/с.

Номинальная площадь поверхности трения S_n :

$$S_n = \pi \cdot d_2 \cdot m \left(\frac{d - d_1}{2 \cos \beta} \right) z , \text{ мм}^2. \quad (4.99)$$

Контурный путь трения для передачи винт-гайка несоосная:

$$L_k = \frac{\pi \cdot d}{12} , \text{ мм}^2. \quad (4.100)$$

Расчетные зависимости для передачи винт-гайка волновая

Удельное давление в контакте винт–гайка волновая определяется по формуле:

$$p = \frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot m (d^2 - d_1^2) \cdot z} , \text{ Н/мм}^2 , \quad (4.101)$$

где z – коэффициент взаимного перекрытия.

Примечание: Для передач винт–гайка волновая $z = 1/8$.

Скорость скольжения в контакте винт–гайка волновая:

$$v_{ск} = \frac{v_{oc}}{\sin \beta}, \text{ мм/с}, \quad (4.102)$$

где v_{oc} – линейная скорость перемещения винта или гайки.

Номинальная площадь поверхности трения S_n :

$$S_n = \pi \cdot d_2 \cdot m \left(\frac{d - d_1}{2 \cos \beta} \right) \cdot z, \text{ мм}^2. \quad (4.103)$$

Контурный путь трения для передачи винт–гайка волновая:

$$L_k = \frac{\pi \cdot d}{6}, \text{ мм}. \quad (4.104)$$

4.4. Примеры расчета на привносимый уровень загрязнений для модулей перемещения типа винт-гайка

Исходные данные:

Размер винта: наружный диаметр $d = 10$ мм;

средний диаметр $d_2 = 9,35$ мм;

внутренний диаметр $d_1 = 8,773$ мм.

Материал: винта – *сталь 35ХГСА*, гайки – *сталь 35ХГСА*.

Расчетное число витков $m = 8$.

Осевая нагрузка на винте $F_a = 100$ Н.

Частота вращения $n = 600$ об/мин.

Угол подъема нарезки $\lambda = 3^0$.

Угол профиля резьбы $\beta = 60^0$.

Шаг резьбы $\rho = 0,75$ мм.

Параметры шероховатости: $R = 12$ мкм; $R_{max} = 2,3$ мкм.

Модули упругости контактирующих материалов:

$E_1 = 1,8 \cdot 10^5$ Н/мм²; $E_2 = 1,8 \cdot 10^5$ Н/мм².

Пример расчета для передачи винт-гайка

Определяем удельное давление в контакте для передачи винт-гайка по формуле (4.93):

$$p = \frac{4F_a}{\pi \cdot m(d^2 - d_1^2)} = \frac{4 \cdot 100}{3,14 \cdot 8 (10^2 - 8,773^2)} = 0,69 \text{ Н/мм}^2.$$

Определяем радиус фрикционного пятна контакта при упругом контакте для передачи винт-гайка по формуле (4.84):

$$b = 0,7 \sqrt[3]{4 \cdot p \cdot R \cdot R_{\max} (2R - R_{\max}) \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)} =$$

$$= 0,7 \sqrt[3]{4 \cdot 0,69 \cdot 12 \cdot 2,3 (24 - 2,3) \cdot 10^{-9} \left(\frac{1}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1}{2,1 \cdot 10^5} \right)} = 1,754 \cdot 10^{-4} \text{ мм} .$$

Находим величину контактных напряжений σ_H , которые не должны превышать допускаемых σ_{HP} по формуле (4.85) для передачи винт-гайка:

$$\sigma_H = \frac{6 \cdot p \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{\pi \cdot b^2} = \frac{6 \cdot 0,69 \cdot 2,3 \cdot 21,7 \cdot 10^6}{3,14 (1,754 \cdot 10^{-4})^2} = 2137 \text{ Н/мм}^2 .$$

Для стали 35ХГСА $\sigma_{HP} = 410 \text{ Н/мм}^2$, что меньше чем $\sigma_H = 2137 \text{ Н/мм}^2$, поэтому расчет радиуса фрикционного пятна контакта для передачи винт – гайка определяем по формуле (4.86):

$$b = 1,4 \sqrt{\frac{p \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{H_\mu}} = 1,4 \sqrt{\frac{0,69 \cdot 2,3 \cdot 21,7 \cdot 10^6}{640}} = 3,25 \cdot 10^{-4} \text{ мм} .$$

При этом $\sigma_H = H_\mu = 640 \text{ Н/мм}^2$.

Определяем среднюю линейную интенсивность изнашивания для передачи винт-гайка по формуле (4.87):

$$J_h = \frac{\pi}{8} \cdot 10^{-7} \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4f^2}}{\sigma_{HP}} \right) \cdot \frac{b (R - \sqrt{R^2 - b^2})}{R_{\max} (2R - R_{\max})} =$$

$$= \frac{3,14}{8} \cdot 10^{-7} \left(\frac{640 \sqrt{1 + 4 \cdot 0,93^2}}{410} \right)^6 \cdot \frac{3,25 \cdot 10^4 \left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{(12 \cdot 10^{-3})^2 - (3,25 \cdot 10^{-3})^2} \right)}{2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 21,7 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 1,44 \cdot 10^{-9} .$$

Определяем объем изношенной частицы для передачи винт – гайка по

формуле (4.88):

$$W = \frac{\pi}{2} \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) \cdot \left[b^2 + \frac{\left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)^3}{3} \right] =$$

$$= \frac{3,14}{2} \left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\left(12 \cdot 10^{-3} \right)^2 - \left(0,325 \cdot 10^{-3} \right)^2} \right) \cdot$$

$$\cdot \left(3,25 \cdot 10^{-4} + \frac{\left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\left(12 \cdot 10^{-3} \right)^2 - \left(0,325 \cdot 10^{-3} \right)^2} \right)^3}{3} \right) = 7,299 \cdot 10^{-12} \text{ мм}^3.$$

Определяем скорость скольжения в контакте винт – гайка по формуле (4.94):

$$v_{ск} = \frac{\pi \cdot n \cdot d_2}{60 \cdot \cos \lambda} = \frac{3,14 \cdot 600 \cdot 9,35}{60 \cos 3^0} = 294 \text{ мм/с}.$$

Определяем номинальную площадь поверхности трения для передачи винт – гайка по формуле (4.92):

$$S_i = \pi \cdot d_2 \cdot m \left(\frac{d - d_1}{2 \cos \beta} \right) = 3,14 \cdot 9,35 \cdot 8 \frac{10 - 8,773}{2 \cdot \cos 60^0} = 288,188 \text{ мм}^2.$$

Определяем среднее количество частиц износа из узла трения для передачи винт – гайка по формуле (4.89):

$$N = \frac{J_h \cdot v_{ск} \cdot S_n}{W} = \frac{1,44 \cdot 10^{-9} \cdot 288,188 \cdot 294}{7,299 \cdot 10^{-12}} = 1,672 \cdot 10^6 \text{ 1/с}.$$

Определяем контурный путь трения для передачи винт – гайка по формуле (4.96):

$$L_k = \pi \cdot d = 3,14 \cdot 10 = 31,4 \text{ мм} .$$

Определяем минимальное количество частиц износа для передачи винт-гайка по формуле (4.90):

$$N_{\min} = N \frac{2b}{L_k} = 1,672 \cdot 10^6 \frac{2 \cdot 3,25 \cdot 10^{-4}}{31,4} = 17,3 \text{ 1/с} .$$

Определяем максимальный объем изношенной частицы для передачи винт – гайка по формуле (4.91):

$$W_{\max} = W \frac{L_k}{2b} = 7,299 \cdot 10^{-12} \frac{31,4}{2 \cdot 3,25 \cdot 10^{-4}} = 3,52 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3 .$$

Определяем максимальный размер изношенной частицы для передачи винт – гайка по формуле (4.92):

$$\hat{A}_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot W_{\max}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 3,52 \cdot 10^{-7}}{3,14}} = 8,76 \cdot 10^{-3} \text{ мм} .$$

Пример расчета для передачи винт-гайка несоосная

Определяем удельное давление в контакте винт – гайка несоосная по формуле (4.97):

$$\rho = \frac{4F_a}{\pi \cdot m (d^2 - d_1^2) \cdot z} = \frac{4 \cdot 100}{3,14 \cdot 8 (10^2 - 8,773^2) \cdot \frac{1}{16}} = 11,04 \text{ Н/мм}^2 .$$

Определяем радиус фрикционного пятна контакта при упругом контакте для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.84):

$$\begin{aligned}
b &= 0,7 \sqrt[3]{4 \cdot \rho \cdot R \cdot R_{\max} (2R - R_{\max}) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)} = \\
&= 0,7 \sqrt[3]{4 \cdot 11,04 \cdot 12 \cdot 2,3 \cdot 21,3 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1}{2,1 \cdot 10^5} \right)} = \\
&= 4,396 \cdot 10^{-4} \text{ мм} .
\end{aligned}$$

Находим величину контактных напряжений σ_H , которые на должны превышать допускаемых σ_{HP} по формуле (4.85) для передачи винт – гайка несоосная:

$$\sigma_H = \frac{6 \cdot \rho \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{\pi b^2} = \frac{6 \cdot 11,04 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 21,3 \cdot 10^{-3}}{3,14 (4,396 \cdot 10^{-4})^2} = 5344 \text{ Н/мм}^2 .$$

Для стали 35ХГСА $\sigma_{HP} = 410 \text{ Н/мм}^2$, что меньше, чем $\sigma_H = 5344 \text{ Н/мм}^2$, поэтому расчет радиуса фрикционного пятна контакта для передачи винт – гайка несоосная выполним по формуле (4.86):

$$b = 1,4 \sqrt{\frac{\rho \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{H_\mu}} = 1,4 \sqrt{\frac{11,04 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 2,17 \cdot 10^{-3}}{640}} = 1,286 \cdot 10^{-3} \text{ мм} .$$

При этом $\sigma_H = H_\mu = 640 \text{ Н/мм}^2$.

Определяем среднюю линейную интенсивность изнашивания для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.87):

$$\begin{aligned}
J_h &= \frac{\pi}{8} \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4 \cdot f^2}}{\sigma_{HP}} \right)^6 \cdot \frac{b (R - \sqrt{R^2 - b^2})}{R_{\max} (2R - R_{\max})} = \\
&= \frac{3,14}{8} \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{640 \sqrt{1 + 4 \cdot 0,93^2}}{410} \right)^6 \cdot \frac{1,286 \cdot 10^{-3} \left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{(12 \cdot 10^{-3})^2 - (1,286 \cdot 10^{-3})^2} \right)}{2,3 \cdot 10^{-3} (2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} - 2,3 \cdot 10^{-3})} = \\
&= 8,967 \cdot 10^{-8} .
\end{aligned}$$

Определяем объем изношенной частицы для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.88):

$$W = \frac{\pi}{2} \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) \cdot \left[b^2 + \frac{\left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)^3}{3} \right] =$$

$$= \frac{3,14}{2} \left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\left(12 \cdot 10^{-3} \right)^2 - \left(1,286 \cdot 10^{-3} \right)^2} \right) \cdot$$

$$\left[\left(1,286 \cdot 10^{-3} \right)^2 + \frac{\left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\left(12 \cdot 10^{-3} \right)^2 - \left(1,286 \cdot 10^{-3} \right)^2} \right)^3}{3} \right] = 1,39 \cdot 10^{-10} \text{ мм}^3.$$

Определяем скорость скольжения в контакте винт-гайка несоосная по формуле (4.98):

$$v_{ск} = \frac{v_{oc}}{\sin \beta} = \frac{n \cdot P}{60 \sin \beta} = \frac{600 \cdot 0,75}{60 \sin 60^0} = 8,66 \text{ мм/с}.$$

Определяем номинальную площадь поверхности трения для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.99):

$$S_n = \pi \cdot d_2 \cdot m \left(\frac{d - d_1}{2 \cos \beta} \right) z = 3,14 \cdot 9,35 \cdot 8 \frac{(10 - 8,773)}{2 \cos 60^0} \cdot \frac{1}{16} = 18,011 \text{ мм}^2.$$

Определяем среднее количество частиц износа из узла трения для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.89):

$$N = \frac{J_h \cdot v_{ск} \cdot S_n}{\omega} = \frac{8,967 \cdot 10^{-8} \cdot 866 \cdot 18,011}{1,39 \cdot 10^{-10}} = 1,006 \cdot 10^5 \text{ 1/с}.$$

Определяем контурный путь трения для передачи винт – гайка

несоосная по формуле (4.100):

$$L_k = \frac{\pi \cdot d}{12} = \frac{3,14 \cdot 10}{12} = 2,618 \text{ мм} .$$

Определяем минимальное количество частиц износа для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.90):

$$N_{\min} = N \frac{2b}{L_k} = 1,006 \cdot 10^5 \frac{2 \cdot 1,286 \cdot 10^{-3}}{2,618} = 98,8 \text{ 1/с} .$$

Определяем максимальный объем изношенной частицы для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.91):

$$W_{\max} = W \frac{L_k}{2b} = 1,39 \cdot 10^{-9} \frac{2,618}{2 \cdot 1,286 \cdot 10^{-3}} = 1,415 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3 .$$

Определяем максимальный размер изношенной частицы для передачи винт – гайка несоосная по формуле (4.92):

$$B_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot W_{\max}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 1,415 \cdot 10^{-7}}{3,14}} = 6,46 \cdot 10^{-3} \text{ мм} .$$

Пример расчета для волновой резьбовой передачи

Определяем удельное давление в контакте для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.101):

$$\rho = \frac{4 \cdot F_a}{\pi \cdot m (d^2 - d_1^2) \cdot z} = \frac{4 \cdot 100 \cdot 8}{3,14 \cdot 8 \cdot (10^2 - 8,773^2) \cdot 1} = 5,52 \text{ Н/мм}^2 .$$

Определяем радиус фрикционного пятна контакта при упругом контакте для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.84):

$$b = 0,7 \sqrt[3]{4 \cdot \rho \cdot R \cdot R_{\max} (2R - R_{\max}) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)} =$$

$$= 0,7 \cdot \sqrt[3]{4 \cdot 5,52 \cdot 12 \cdot 2,3 \cdot 21,7 \cdot 10^{-9} \left(\frac{1}{2,1 \cdot 10^5} + \frac{1}{2,1 \cdot 10^5} \right)} = 3,51 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

Находим величину контактных напряжений σ_H , которые на должны превышать допускаемых σ_{HP} по формуле (4.85) для передачи винт – гайка волновая:

$$\sigma_H = \frac{6 \cdot \rho \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{\pi b^2} = \frac{6 \cdot 5,52 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 21,7 \cdot 10^{-3}}{3,14 (3,51 \cdot 10^{-4})^2} = 4191 \text{ Н/мм}^2.$$

Для стали 35ХГСА $\sigma_{HP} = 410 \text{ Н/мм}^2$, что меньше, чем $\sigma_H = 4191 \text{ Н/мм}^2$, поэтому расчет радиуса фрикционного пятна контакта для передачи винт – гайка волновая выполним по формуле (4.86):

$$b = 1,4 \sqrt{\frac{\rho \cdot R_{\max} (2R - R_{\max})}{H_\mu}} = 1,4 \sqrt{\frac{5,52 \cdot 2,3 \cdot 10^{-3} \cdot 21,7 \cdot 10^{-3}}{640}} = 9,184 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

При этом $\sigma_H = H_\mu = 640 \text{ Н/мм}^2$.

Определяем среднюю линейную интенсивность изнашивания для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.87):

$$J_h = \frac{\pi}{8} \cdot 10^7 \cdot \left(\frac{\sigma_H \sqrt{1 + 4 \cdot f^2}}{\sigma_{HP}} \right)^6 \cdot \frac{b (R - \sqrt{R^2 - b^2})}{R_{\max} (2R - R_{\max})} =$$

$$= \frac{3,14}{8} \cdot 10^{-7} \left(\frac{640 \sqrt{1 + 4 \cdot 0,93^2}}{410} \right)^6 \cdot \frac{9,185 \cdot 10^{-4} \left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{(12 \cdot 10^{-3})^2 - (9,185 \cdot 10^{-4})^2} \right)}{2,3 \cdot 10^{-3} (2 \cdot 12 \cdot 10^{-3} - 2,3 \cdot 10^{-3})} =$$

$$= 3,263 \cdot 10^{-8}$$

Определяем объем изношенной частицы для передачи винт – гайка

волновая по формуле (4.88):

$$W = \frac{\pi}{2} \cdot \left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right) \cdot \left[b^2 + \frac{\left(R - \sqrt{R^2 - b^2} \right)^3}{3} \right] =$$

$$= \frac{3,14}{2} \left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\left(12 \cdot 10^{-3} \right)^2 - \left(9,185 \cdot 10^{-4} \right)^2} \right) \cdot$$

$$\left[\left(9,185 \cdot 10^{-4} \right)^2 + \frac{\left(12 \cdot 10^{-3} - \sqrt{\left(12 \cdot 10^{-3} \right)^2 - \left(9,185 \cdot 10^{-4} \right)^2} \right)^3}{3} \right] = 5,076 \cdot 10^{-12} \text{ мм}^3.$$

Определяем скорость скольжения в контакте винт – гайка волновая по формуле (4.102):

$$v_{ск} = \frac{v_{oc}}{\sin \beta} = \frac{600 \cdot 0,75}{60 \sin 60^\circ} = 8,66 \text{ мм/с}.$$

Определяем номинальную площадь поверхности трения для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.103):

$$S_H = \pi \cdot d_2 \cdot m \left(\frac{d - d_1}{2 \cos \beta} \right) \cdot z = 3,14 \cdot 9,35 \cdot 8 \frac{10 - 8,773}{2 \cdot \cos 60^\circ} \cdot \frac{1}{8} = 36,024 \text{ мм}^2.$$

Определяем среднее количество частиц износа из узла трения для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.89):

$$N = \frac{J_h \cdot v_{ск} \cdot S_H}{W} = \frac{3,263 \cdot 10^{-8} \cdot 8,66 \cdot 36,024}{5,076 \cdot 10^{-12}} = 2,005 \cdot 10^6 \text{ 1/с}.$$

Определяем контурный путь трения для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.85):

$$L_k = \frac{\pi \cdot d}{6} = \frac{3,14 \cdot 10}{6} = 5,233 \text{ мм} .$$

Определяем минимальное количество частиц износа для передачи винт-гайка волновая по формуле (4.90):

$$N_{\min} = N \frac{2b}{L_k} = 2,005 \cdot 10^6 \frac{2 \cdot 9,185 \cdot 10^{-4}}{5,233} = 7,038 \cdot 10^2 \text{ 1/с} .$$

Определяем максимальный объем изношенной частицы для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.91):

$$W_{\max} = W \frac{L_k}{2b} = 5,076 \cdot 10^{-12} \frac{5,233}{2 \cdot 9,185 \cdot 10^{-4}} = 2,89 \cdot 10^{-8} \text{ мм}^3 .$$

Определяем максимальный размер изношенной частицы для передачи винт – гайка волновая по формуле (4.92):

$$B_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot W_{\max}}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 2,89 \cdot 10^{-8}}{3,14}} = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ мм} .$$

Разработанная методика расчета различных типов винтовых механизмов на привносимый уровень загрязнений позволяет уже на стадии проектирования прогнозировать размеры и количество образующихся частиц износа, оказывающих существенное загрязняющее воздействие на технологическую среду.

В случае повышения предельнодопустимого значения дефектности надлежит идти следующими путями:

1. Выбор конструкционных материалов, которые удовлетворяли бы требованиям по критерию минимального износа.
2. Выбор смазок и смазочных материалов с целью снижения коэффициента трения.
3. Выбор оптимального способа обработки контактирующих поверхностей.

ГЛАВА 5. ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МОДУЛИ РОСТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Устройства на основе ℓ -координат могут быть использованы в качестве как исполнительных, так и информационных, их можно использовать в конструкциях роботов и манипуляторов, загрузочно-транспортных устройствах, устройствах гашения колебаний ростового оборудования. При этом в качестве привода применяют любые известные типы приводов: пневмоэлектромеханический, пьезоэлектрический и магнитострикционный. Целесообразность применения этого или иного типа привода обуславливается точностью позиционирования, при этом во всех случаях точность манипуляционной системы на базе ℓ -координат всегда будет выше, чем точность аналогичной манипуляционной системы на основе классических координат Декарта-Эйлера.

Существующие модули виброзащиты объектов электронной техники не обеспечивают гашения колебаний по всем шести степеням подвижности. В предложенной системе на основе ℓ -координат этот недостаток классических амортизаторов устраняется. Виброзащитная система состоит из шести амортизаторов, связанных по структуре ℓ -координат. В качестве элементной базы таких систем используют стандартные пневмогасители колебаний пружинного типа и др.

Глава посвящена определению собственных частот и коэффициентов демпфирования ℓ -координатной системы в зависимости от массы, коэффициентов жесткости, сопротивления и характера расположения амортизаторов на основании и в объекте.

5.1. Виброзащитные модули ростового оборудования с одной степенью свободы

Виброизолирующее устройство представляет важнейшую часть виброзащитного модуля, его назначение состоит в создании такого режима движения, инициируемого заданными возмущениями, при котором реализуется цель защиты объекта. Во многих случаях это оказывается достижимым при использовании безинерционного виброизолирующего устройства, которое для схем, изображенных на рис. 5.1, представляет одноосный виброизолятор. Для такого виброизолятора реакции R и R_ℓ совпадают по величине ($R=R_\ell$), причем в рассматриваемом ниже простейшем случае реакцию R можно считать пропорциональной деформации δ и скорости деформации $\dot{\delta}$ виброизолятора [156]:

$$R = c\delta + b\dot{\delta}. \quad (5.1)$$

Зависимость (5.1) описывает линейную характеристику простого безинерционного виброизолятора. Коэффициенты c и b называются соответственно жесткостью и коэффициентом демпфирования. При $b=0$ (5.1) описывает характеристику линейного идеального упругого элемента (пружины); при $c=0$ – характеристику линейного вязкого демпфера. Таким образом, модель виброизолятора с характеристикой (5.1), можно представить в виде параллельного соединения пружины и демпфера (см. рис. 5.1)

m – соответственно масса и координата несомого тела;

F – сила, приложенная к несомому телу;

ζ – координата основания;

c, b – соответственно жесткость и коэффициент демпфирования виброизолятора.

Коэффициент жесткости c виброизолятора с линейной характеристикой (5.1) определяет собственную частоту системы:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}. \quad (5.2)$$

Значение c определяет также статическую деформацию $\delta_{СТ}$ (осадку) виброизолятора, связанную с

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{\delta_{СТ}}},$$

где $\delta_{СТ}$ – деформация под осевой статической нагрузкой $mg \sin \alpha$;

m – масса несомого тела;

α – угол наклона виброизолятора к горизонту.

Зависимость $\omega_0 = \omega_0(\delta_{СТ})$ приведена на рис. 5.2.

Демпфирующие свойства системы, представленной на рис. 5.2 характеризуются коэффициентом демпфирования

$$n = \frac{b}{2m}, \quad (5.3)$$

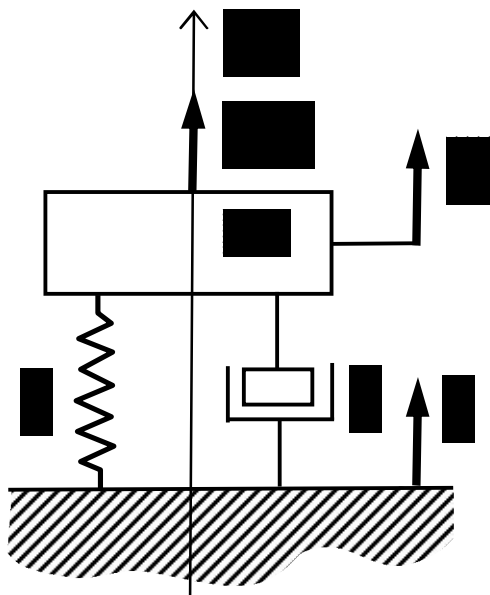


Рис 5.1. Расчетная модель простейшей вибрационной системы с одной степенью свободы [156]

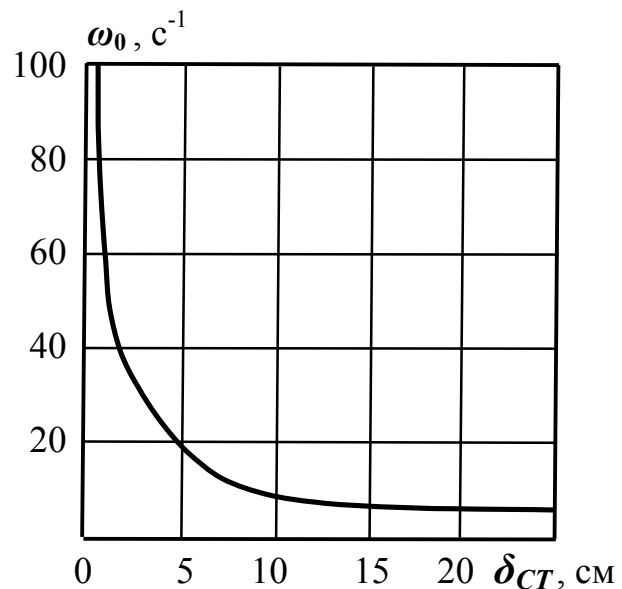


Рис 5.2. Зависимость собственной частоты ω_0 простейшей виброзащитной системы от статической осадки $\delta_{СТ}$ виброизолятора

и относительным демпфированием

$$V = \frac{n}{\omega_0} = \frac{b}{2\sqrt{cm}}, \quad (5.4)$$

при $V = 1$ в системе реализуется критическое демпфирование.

Эффективность виброзащиты.

Коэффициенты эффективности при гармоническом возбуждении

Под эффективностью виброзащиты понимается степень реализации виброзащитным устройством целей виброзащиты [156]

При силовом гармоническом возбуждении

$$F(t) = F_0 \sin \omega t ; \quad \zeta(t) = 0,$$

где F_0 и ω – соответственно амплитуда и частота вынуждающей силы; цель защиты может состоять в уменьшении амплитуды F_0 силы, передаваемой на неподвижный объект,

$$R_0 = \frac{F_0 \sqrt{\omega_0^4 + 4n^2 \omega^2}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}}, \text{ Н}, \quad (5.5)$$

или в уменьшении амплитуды X_0 установившихся вынужденных колебаний источника:

$$X_0 = \frac{F_0}{m \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}}, \text{ мм}. \quad (5.6)$$

При кинематическом гармоническом возбуждении

$$F(t) = 0 ; \quad \zeta(t) = \zeta_0 \sin \omega t , \quad (5.7)$$

цель защиты может заключаться в уменьшении амплитуды абсолютного ускорения (перегрузки) объекта

$$W = \frac{\zeta_0 \omega^2 \sqrt{\omega_0^4 + 4n^2 \omega^2}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}}, \quad (5.8)$$

а также в уменьшении амплитуды его колебаний относительно основания:

$$X'_0 = \frac{\zeta_0 \omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2 \omega^2}}; \quad (5.9)$$

Количественно степень реализации цели виброзащиты можно охарактеризовать значениями безразмерных коэффициентов эффективности. Для расчетной модели, изображенной на рис. 5.1, при силовом возбуждении вводят коэффициенты:

$$K_R = \frac{R_0}{F_0}; \quad K_X = \frac{cX_0}{F_0}. \quad (5.10)$$

В случае кинематического возбуждения рассматривают коэффициенты:

$$K_R = \frac{W}{\omega^2 \zeta_0}; \quad K_{X'} = \frac{x'_0}{\zeta_0}. \quad (5.11)$$

Величины K_R и K_x называют соответственно коэффициентом виброизоляции и коэффициентом динамичности.

Зависимость K_R , K_x и $K_{x'}$ от безразмерных параметров $z = \omega / \omega_0$ и V имеет вид:

$$K_R = \frac{\sqrt{1 + 4V^2 z^2}}{\sqrt{(1 - z^2)^2 + 4V^2 z^2}}; \quad (5.12)$$

$$K_x = \frac{1}{\sqrt{(1 - z^2)^2 + 4V^2 z^2}};$$

$$K_{x'} = \frac{z^2}{\sqrt{(1-z^2)^2 + 4V^2 z^2}} .$$

Условия эффективности виброзащиты по критериям K_R , K_x и $K_{x'}$.

Условия эффективности виброзащиты по критериям K_R , K_x , $K_{x'}$, формируют в виде неравенств:

$$K_R \leq 1; \quad K_x \leq 1; \quad K_{x'} \leq 1. \quad (5.13)$$

Поскольку указанные коэффициенты зависят от частоты, можно говорить об эффективности виброзащиты на одной частоте z или в заданном частотном диапазоне $z_1 \leq z \leq z_2$. Анализ соотношений (5.13) приводит к следующим выводам.

1. Эффективность виброзащиты по критерию $K_R \leq 1$ обеспечивается при любом уровне демпфирования в частном диапазоне

$$z \geq \sqrt{2} . \quad (5.14)$$

При любом z из диапазона (5.14) эффективность тем выше, чем слабее демпфирование. Наилучшей эффективностью обладает идеально упругий виброизолятор ($V = 0$).

2. Эффективность виброзащиты по критерию $K_x \leq 1$ также обеспечивается в диапазоне (5.14) при любых значениях V . При $V > 1/\sqrt{2}$ виброзащита эффективна во всем диапазоне частот $0 < z < \infty$; при $V < 1/\sqrt{2}$ эффективность имеет место в диапазоне

$$z > \sqrt{2(1-2V^2)} . \quad (5.15)$$

При фиксированной величине V эффективность повышается с ростом демпфирования.

3. Виброзащита по критерию $K_{x'} \leq 1$ эффективна во всем частотном

диапазоне $V > 1/\sqrt{2}$, а при $V < 1/\sqrt{2}$ – диапазоне

$$0 < z < \frac{1}{\sqrt{2(1-2V^2)}}. \quad (5.16)$$

Степень эффективности на фиксированной частоте z повышается с ростом демпфирования; а в худшем случае (при $V = 0$) диапазон эффективности соответствует полосе

$$0 < z < 1/\sqrt{2}. \quad (5.17)$$

Зависимости $K_R = K_R(z, V)$; $K_X = K_X(z, V)$; $K_{X'} = K_{X'}(z, V)$ при фиксированных V представлены на рисунках в конце главы. Эти зависимости можно рассматривать как амплитудно-частотные характеристики рассматриваемой системы по соответствующим входу и выходу.

5.2. Математическая модель виброзащитного модуля ростового оборудования на шесть степеней свободы

Рассмотрим движение выходного звена (ВЗ) ИУ массы m в пространстве, то есть задачу с шестью степенями свободы. Введем две системы координат: неподвижную систему координат $O\xi\eta\zeta$ и подвижную систему координат O_1xyz , связанную с твердым телом. Причем начало координат совпадает с центром масс. Пусть известны координаты трех точек твердого тела $M_1 (X_1, O, O)$; $M_2 (X_2, Y_2, O)$; $M_3 (X_3, Y_3, Z_3)$. Кроме того, зафиксируем на плоскости $O\xi\eta$ две точки с координатами $A_1 (O_1, \eta_1^0, O)$ и $A_2 (\xi_2^0, \eta_2^0, O)$. Поместим в точки $M_1, M_2, M_3, O, A_1, A_2$ сферические шарниры и соединим указанные точки упругими и вязкими элементами (рис. 5.3). При этом точка O соединяется с точками M_1 и M_2 пружинами коэффициентами жесткости K_1 и K_2 и демпферами с сопротивлением b_1, b_2 , точка A_1 соединяется с точкой M_2 пружиной с коэффициентом

жесткости K_3 и демпфером с коэффициентом сопротивления b_3 , точка A_2 соединяется с точками M_2 , M_3 и M_1 пружинами с коэффициентами жесткости соответственно K_4 , K_5 и K_6 и демпферами с коэффициентами сопротивления b_4 , b_5 и b_6 . Обозначим $\ell_1=OM_1$; $\ell_2=OM_2$; $\ell_3=OM_3$; $\ell_4 = A_2M_2$; $\ell_5 = A_5M_6$; $\ell_6 = A_4M_4$ [181, 182].

В окрестности заданного положения твердого тела линейные параметры $\ell_1, \ell_2, \ell_3, \ell_4, \ell_5, \ell_6$ полностью определяют положения твердого тела.

Итак, известными величинами считаются $M, \eta_1^0, \xi_2^0, \eta_2^0, X_1, Y_1, Z_1, X_2, Y_2, Z_2, X_3, Y_3, Z_3; K_i, i = 1, \dots, 6; b_i$.

$i = 1 \dots 6; \ell_i, i = 1, \dots, 6$ – длины отрезков ℓ_i , когда пружины не деформированы.

I_x, I_y, I_z – момент инерции ВЗ относительно осей O_1X, O_1Y, O_1Z соответственно.

Определим коэффициенты деформирования и собственные частоты колебания твердого тела около начального положения заданного значения ℓ_i^H , $i = 1, \dots, 6$.

Выразим связь ℓ -координат с естественными координатами (см. рис. 5.2).

Обозначим координаты центра масс твердого тела в неподвижной системе координат через $O_1 (\xi_0, \eta_0, \zeta_0)$. Движение твердого тела вокруг точки O_1 можно описать с помощью углов Эйлера φ, ψ, θ . Координаты $\xi_0, \eta_0, \zeta_0, \varphi, \psi, \theta$ будем называть естественными координатами.

Углы Эйлера вводятся следующим образом. Через точку O_1 проведем оси $O_1\xi', O_1\eta', O_1\zeta'$ параллельные неподвижным осям $O\xi, O\eta, O\zeta$. Линию пересечения плоскостей XO_1Y и $\xi'O_1\eta'$ обозначим через O_1N . Угол собственного вращения φ – угол между осью O_1X и прямой O_1N . Угол прецессии ψ – угол между осью $O_1\xi'$ и $O_1'\zeta'$. Угол нутации θ – угол между осями O_1Z и $O_1\zeta'$.

Пусть во вращающейся системе координат O_1XYZ точка имеет координаты (X, Y, Z) . Тогда координаты этой точки в неподвижной системе

координат можно определить по формулам:

$$\xi = \xi_0 + x(\cos\psi \cos\varphi - \cos\theta \sin\psi \sin\varphi) + y(-\cos\psi \sin\varphi - \cos\theta \sin\psi \cos\varphi) + z \cdot \sin\varphi \sin\psi ;$$

$$\eta = \eta_0 + x(\sin\psi \cos\varphi - \cos\theta \cos\psi \sin\varphi) + y(-\sin\psi \sin\varphi - \cos\theta \cos\psi \cos\varphi) - z \cdot \cos\theta \cos\psi ;$$

$$\zeta = \zeta_0 + \cos\theta \sin\varphi + y \cdot \sin\theta \cos\varphi + z \cdot \cos\theta .$$

Для более удобного вывода дифференциальных уравнений движения твердого тела со связями и для получения более симметричной формы связи ℓ -координат с естественными координатами предложим другую постановку задачи [201, 205].

Пусть известны координаты шести точек твердого тела ($i = 1, \dots, 6$) $M_i(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$. Кроме того зафиксируем на плоскости $O\xi\eta$ шесть точек с координатами $A_i(\hat{\xi}_i^0, \hat{\eta}_i^0, O)$. Поместим в точки M_i и A_i ($i = 1, \dots, 6$) невесомые шарниры и соединим указанные точки упругими и вязкими элементами. При этом точка A_i соединяется с точкой M_i пружиной с коэффициентом жесткости K_i и демпфером с вязкостью b_i ($i = 1, \dots, 6$).

Обозначим $\ell_i = A_i M_i$ ($i = 1, \dots, 6$).

В окрестности заданного положения твердого тела линейные параметры ℓ ($i=1, \dots, 6$) полностью определяют положение твердого тела. Параметры ℓ_i – это те же ℓ -координаты, что и в работе. Требуется решить следующую задачу: определить коэффициенты демпфирования и собственные частоты колебаний твердого тела около начального положения твердого тела, заданного значениями: ℓ_i^H , $i = 1, \dots, 6$.

Эта задача эквивалентна исходной задаче если отождествить точку A_1 с A_2 точки A_4 , A_5 и A_6 точку M_1 с точкой M_6 , а также точки M_2 , M_3 , и M_4 , т.е. положить:

$$\begin{aligned}
\hat{\xi}_1^0 &= \eta_1^0 = 0, \\
\hat{\xi}_2^0 &= \eta_2^0 = 0, \\
\hat{\xi}_3^0 &= 0, \quad \eta_3^0 = 0, \\
\hat{\xi}_4^0 &= \xi_2^0, \quad \hat{\eta}_4^0 = \eta_2^0, \\
\hat{\xi}_5^0 &= \xi_2^0, \quad \hat{\eta}_5^0 = \eta_2^0, \\
\hat{\xi}_6^0 &= \xi_2^0, \quad \hat{\eta}_6^0 = \eta_2^0.
\end{aligned} \tag{5.18}$$

Кроме того, учитывая, что в неподвижной системе координат точки M_i имеют координаты $M_i(\hat{\xi}_i, \hat{\eta}_i, \hat{\zeta}_i)$.

$$\begin{aligned}
\hat{\xi}_1 &= \xi_1, \quad \hat{\eta}_1 = \eta_1, \quad \hat{\zeta}_1 = \zeta_1, \\
\hat{\xi}_2 &= \xi_2, \quad \hat{\eta}_2 = \eta_2, \quad \hat{\zeta}_2 = \zeta_2, \\
\hat{\xi}_3 &= \xi_2, \quad \hat{\eta}_3 = \eta_2, \quad \hat{\zeta}_3 = \zeta_2, \\
\hat{\xi}_4 &= \xi_2, \quad \hat{\eta}_4 = \eta_2, \quad \hat{\zeta}_4 = \zeta_2, \\
\hat{\xi}_5 &= \xi_3, \quad \hat{\eta}_5 = \eta_3, \quad \hat{\zeta}_5 = \zeta_3, \\
\hat{\xi}_6 &= \xi_1, \quad \hat{\eta}_6 = \eta_1, \quad \hat{\zeta}_6 = \zeta_1.
\end{aligned} \tag{5.19}$$

Запишем теперь связь между координатами точек M_i в подвижной и неподвижной системах координат (опуская символ $\hat{}$ над соответствующими координатами точек M_i):

$$\begin{aligned}
\xi_i &= \xi_0 + x_i(\cos \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \psi \sin \varphi) - y_i(\cos \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \psi \cos \varphi) + \\
&+ z_i \cdot \sin \theta \cos \psi ;
\end{aligned}$$

$$\eta_i = \eta_0 + x_i(\sin \psi + \cos \theta \cos \psi) \cos \varphi + y_i(\sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \psi \cos \varphi) - z_i \cdot \sin \theta \cos \psi ; \quad (5.20)$$

$$\zeta_i = \zeta_0 + x_i \cdot \sin \theta \sin \varphi + y_i \cdot \sin \theta \cos \psi + z_i \cdot \cos \theta .$$

Связь между ℓ -координатами $\ell_i (i=1 \dots 6)$ и естественными координатами $\xi_0, \eta_0, \zeta_0, \varphi, \theta, \psi$ можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \ell_i^0 &= (\xi_i - \xi_i^0)^2 + (\eta_i - \eta_i^0)^2 + \zeta_i^2, \\ i &= 1, \dots, 6, \end{aligned} \quad (5.21)$$

где ξ_i, η_i, ζ_i выражаются через $\xi_0, \eta_0, \zeta_0, \varphi, \theta, \psi$ по формулам (5.20), а $(\xi_i^0, \eta_i^0, 0)$ – координаты точек A_i, ζ .

$$\xi_i^0 = \text{const}; \quad \eta_i^0 = \text{const}.$$

Заметим, что если решение в начальный момент времени $t = t_0$ нам даны параметры $\ell_i^H, i = 1, \dots, 6$, то величины $\xi_o^H, \eta_o^H, \zeta_o^H, \varphi_0, \psi_0, \theta_0$ однозначно определяются численно по формулам (5.21).

Решим уравнение (5.21) относительно величин $\xi_o^H, \eta_o^H, \zeta_o^H, \varphi_0, \psi_0, \theta_0$.

Эту связь необходимо знать для построения зависимостей собственных частот и коэффициентов демпфирования от параметров системы. С учетом соотношений (5.18), уравнения (5.21) можно переписать в виде:

$$\ell_1^2 = \xi_1^2 + \eta_1^2 + \zeta_1^2;$$

$$\ell_2^2 = \xi_2^2 + \eta_2^2 + \zeta_2^2;$$

$$\ell_3^2 = \xi_3^2 + (\eta_2 - \eta_1^0)^2 + \zeta_2^2; \quad (5.22)$$

$$\ell_4^2 = (\xi_2 - \xi_2^0)^2 + (\eta_2 - \eta_2^0)^2 + \zeta_2^2;$$

$$\ell_5^2 = (\xi_3 - \xi_2^0)^2 + (\eta_3 - \eta_2^0)^2 + \zeta_3^2;$$

$$\ell_6^2 = (\xi_1 - \xi_2^0)^2 + (\eta_1 - \eta_2^0)^2 + \zeta_1^2,$$

где (O, η_1^0, O) и (ξ_2^0, η_2^0, O) – координаты двух фиксированных точек на плоскости (O, ξ, η) .

Для определения $\eta_0(\varphi, \psi, \theta)$ из третьего уравнения вычтем второе.

$$\ell_3^2 - \ell_2^2 = -2\eta_1^0 \eta_2^p(\varphi, \theta, \psi) + (\eta_1^0)^2,$$

где

$$\begin{aligned} \eta_2^p(\varphi, \theta, \psi) = & x_2(\sin \psi + \cos \theta \cos \psi) \cos \varphi + \\ & + y_2(-\sin \psi \sin \varphi + \cos \theta \cos \psi \cos \varphi) - z_2 \cdot \sin \theta \cos \psi. \end{aligned}$$

Исключая η_0 получим:

$$\eta_0 = \frac{1}{2\eta_1^0} \left[\ell_2^2 - \ell_3^2 - 2\eta_1^0 \eta_2^p(\varphi, \psi, \theta) + (\eta_1^0)^2 \right]. \quad (5.23)$$

Вычитаем из четвертого соотношения системы (5.22) второе:

$$\ell_4^2 - \ell_2^2 = -2\xi_2 \xi_2^0 + \xi_2^{02} + \eta_2^{02} - 2\eta_2 \eta_2^0.$$

Из последнего уравнения определяем

$$(5.24)$$

$$\xi_0(\varphi, \psi, \theta) = -\xi_2^p(\varphi, \psi, \theta) + \frac{1}{2\xi_2^0} \left(\ell_2^2 - \ell_4^2 + \xi_2^2 + (\eta_2^0)^2 - 2\eta_2^0 \eta_0(\varphi, \psi, \theta) \right),$$

где

$$\xi_2^p(\varphi, \psi, \theta) = x_2(\cos \psi \cos \varphi - \cos \theta \sin \psi \sin \varphi) - \\ - y_2(\cos \psi \sin \varphi + \cos \theta \sin \psi \cos \varphi) + z_2 \cdot \sin \theta \sin \psi .$$

Из этого уравнения системы (5.22) для $\zeta_0(\varphi, \theta, \psi)$ получаем выражение

$$\zeta_0(\varphi, \theta, \psi) = -\zeta_0^p(\varphi, \theta, \psi) + \sqrt{\ell_2^2 - \xi_2^2(\varphi, \psi, \theta) - \eta_2^2(\varphi, \psi, \theta)} , \quad (5.25)$$

где

$$\zeta_2^p(\varphi, \theta, \psi) = x_2 \cdot \sin \theta \sin \varphi + y_2 \cdot \sin \theta \cos \varphi + z_2 \cdot \cos \theta ,$$

а в подкоренное выражение подставлены соотношения (5.23) и (5.24).

Для получения выражений (5.23÷5.25) использовалось второе, третье и четвертое из соотношений (5.22). Подставляя (5.23), (5.24) и (5.25) в первое, пятое и шестое уравнения системы (5.22), получим систему из трех уравнений с тремя неизвестными. Для решения этой системы написана вычислительная программа.

Запишем выражение для сил, действующих на точки твердого тела в неподвижной системе координат.

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{\ell_i} (\xi_i^0 - \xi_i, \eta_i^0 - \eta_i - \zeta_i),$$

$$F_i = K_i(\ell_i - \ell_i^0) + b_i \ell_i.$$

Момент силы \bar{F}_i относительно точки O_1 в проекциях на оси неподвижной системы координат имеют вид:

$$F_i = \frac{F_i}{\ell_i} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \xi_i - \xi_0 & \eta_i - \eta_0 & \zeta_i - \zeta_0 \\ \xi_i^0 - \xi_i & \eta_i^0 - \eta_i & -\zeta_i \end{vmatrix} =$$

$$= \frac{F_i}{\ell_i} \left\{ \left[\zeta_i (\eta_0 - \eta_i) - (\zeta_i - \zeta_0) (\eta_i^0 - \eta_i) \right] + \bar{j} \left[(\zeta_i - \zeta_0) (\xi_i^0 - \xi_i) + \zeta_i (\xi_i - \xi_0) \right] + \right. \\ \left. + \bar{K} \left[(\xi_i - \xi_0) (\eta_i^0 - \eta_i) - (\xi_i^0 - \xi_i) (\eta_i - \eta_0) \right] \right\}.$$

Обозначим через M_ξ , M_η , M_ζ следующие выражения:

$$M_\xi = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{\ell_i} \left[\zeta_i (\eta_0 - \eta_i) - (\zeta_i + \zeta_0) (\eta_i^0 - \eta_i) \right];$$

$$M_\eta = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{\ell_i} \left[(\zeta_i - \zeta_0) (\xi_i^0 - \xi_i) + \zeta_i (\xi_i - \xi_0) \right];$$

$$M_\zeta = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{\ell_i} \left[(\xi_i - \xi_0) (\eta_i^0 - \eta_i) - (\xi_i^0 + \xi_i) (\eta_i - \eta_0) \right].$$

Легко записать уравнение движения центра масс твердого тела со связями:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \xi''_0 = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{\ell_i} (\xi_i^0 - \xi_i), \\ m \eta''_0 = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{\ell_i} (\eta_i^0 - \eta_i), \\ m \zeta''_0 = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{\ell_i} \zeta_i - mg. \end{array} \right.$$

А теперь запишем уравнения движения исполнительного устройства ПР, вращающегося вокруг центра масс в проекции на оси O_1X_1 , O_1Y_1 , O_1Z_1 связанным с исполнительным устройством, то есть динамические уравнения Эйлера.

Оси O_1X_1 , O_1Y_1 , O_1Z_1 – жестко связаны с движущимся исполнительным устройством и являются осями инерции твердого тела в точке O_1 , поэтому

главные моменты количеств движения исполнительного устройства относительно координатных осей O_1X_1, O_1Y_1, O_1Z_1 задаются формулами:

$$L_X = I_X W_X ;$$

$$L_Y = I_Y W_Y ;$$

$$L_Z = I_Z W_Z .$$

Здесь

I_X, I_Y, I_Z – главные моменты инерции исполнительного устройства относительно осей O_1X_1, O_1Y_1, O_1Z_1 , являющиеся постоянными величинами;

W_X, W_Y, W_Z – проекции абсолютной угловой скорости твердого тела на оси координат O_1X_1, O_1Y_1, O_1Z_1 .

Динамические уравнения Эйлера имеют вид:

$$O_1X_1, O_1Y_1, O_1Z_1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d L_X}{d t} + W_Y L_Z - W_Z L_Y = M_X^\ell , \\ \frac{d L_Y}{d t} + W_Z L_X - W_X L_Z = M_Y^\ell , \\ \frac{d L_Z}{d t} + W_X L_Y - W_Y L_X = M_Z^\ell , \end{array} \right.$$

где $M_X^\ell, M_Y^\ell, M_Z^\ell$ – главные моменты внешних сил относительно осей координат O_1X_1, O_1Y_1, O_1Z_1 . Эти моменты выражаются через моменты внешних сил относительно осей неподвижной системы координат M_ξ, M_η, M_ζ по следующим формулам:

$$M_X^\ell = M_\xi (\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos \theta) + \\ + M_\eta (\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi \cos \theta) + M_\zeta \cdot \sin \varphi \cos \theta ;$$

$$\begin{aligned} M_Y^\ell = M_\xi (\cos \varphi \cos \psi - \cos \varphi \sin \psi \cos \theta) + \\ + M_\eta (-\sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi \cos \theta) + M_\zeta \cdot \cos \varphi \sin \theta ; \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$M_Z^\ell = M_\xi \cdot \sin \psi \sin \theta + M_\eta \cdot \cos \psi \sin \theta + M_\zeta \cdot \cos \theta .$$

В нашем случае оси X, Y, Z связанные с исполнительным устройством, являются главными осями инерции и точки, поэтому динамические уравнения Эйлера записываются таким образом:

$$\begin{aligned} I_X W_X + (I_Z - I_Y) W_Y W_Z &= M_X^\ell ; \\ I_Y W_Y + (I_X - I_Z) W_Z W_X &= M_Y^\ell ; \\ I_Z W_Z + (I_Y - I_X) W_X W_Y &= M_Z^\ell . \end{aligned} \quad (5.27)$$

Добавим к этим трем дифференциальным уравнениям кинематические уравнения Эйлера, выражающие зависимости между проекциями угловой скорости на соответствующие оси подвижной системы координат, углами Эйлера и их производными по времени:

$$\begin{aligned} W_X &= \dot{\psi} \sin \theta \sin \varphi + \dot{\theta} \sin \varphi ; \\ W_Y &= \dot{\psi} \sin \theta \cos \varphi + \dot{\theta} \cos \varphi ; \\ W_Z &= \dot{\psi} \cos \theta + \dot{\varphi} . \end{aligned} \quad (5.28)$$

Подставляя выражения (5.28) в (5.27), получаем систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} I_X (\dot{\psi} \sin \theta \sin \varphi + \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \sin \varphi + \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \cos \varphi - \\ - \dot{\theta} \dot{\varphi} \sin \varphi) + (I_Z - I_Y) W_Y W_Z = M_X^\ell , \end{aligned}$$

$$I_Y (\ddot{\psi} \sin \theta \cos \varphi + \dot{\theta} \sin \varphi + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \cos \varphi + \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \sin \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \varphi) + (I_X - I_Z) W_Z W_X = M_Y^\ell, \quad (5.29)$$

$$I_Z (\ddot{\psi} \cos \theta + \ddot{\varphi} - \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta) + (I_Y - I_X) W_X W_Y = M_Z^\ell$$

Рассмотрим уравнения (5.29). Это нелинейные уравнения, причем легко убедиться, что матрица при векторе $(\ddot{\varphi}, \ddot{\psi}, \ddot{\theta})^T$ в правой части системы не является симметричной. Для того, чтобы в случае $b_i, i = 1, \dots, 6$ сравнить уравнения (5.29) с уравнениями Лагранжа 2-го рода и использовать программы для ЭВМ, написанные для общей проблемы собственных значений W плоского случая, необходимо привести уравнения к такому виду, чтобы матрица при векторе $(\ddot{\varphi}, \ddot{\psi}, \ddot{\theta})^T$ стала симметричной. Для этого последнее уравнение системы без изменения оставим, назовем его первым.

Для получения второго уравнения новой системы первое уравнение системы (5.29) умножим на $\cos \varphi \sin \theta$, третье на $\cos \theta$, полученные результаты сложим:

$$\begin{aligned} & I_Z \cos \theta \ddot{\varphi} + \ddot{\psi} [I_Z \cos^2 \theta + \sin^2 \theta (I_X \sin^2 \varphi + I_Y \cos^2 \varphi)] + \\ & + \ddot{\theta} (I_X - I_Y) \cos \varphi \sin \varphi \sin \theta + P_\psi (\varphi, \psi, \theta, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) = \\ & = (M_X^\ell \sin \varphi + M_Y^\ell \cos \varphi) \sin \theta + M_Z^\ell \cos \theta, \end{aligned}$$

где $P_\psi (\varphi, \psi, \theta, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta})$ – функции второго порядка относительно производных $\dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}$, а именно:

$$\begin{aligned}
P_\psi(\varphi, \psi, \theta, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) &= \\
&= I_X \sin \varphi \sin \theta (\dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \sin \varphi + \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \sin \varphi) + \\
&\quad + (I_Z - I_Y) W_Y W_Z \sin \varphi \sin \theta + \\
&\quad + I_Y \cos \varphi \sin \theta (\dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \cos \varphi - \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \sin \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \varphi) + \\
&\quad + (I_X - I_Z) W_Z W_X \cos \varphi \sin \theta - I_Z \dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \sin \theta + (I_Y - I_X) \cos \theta .
\end{aligned}$$

Для получения третьего уровня системы с симметричной матрицей из первого уравнения системы (5.29), умноженного на $\cos \varphi$ вычтем второе уравнение системы (5.29); умноженное на $\sin \varphi$.

Получаем:

$$\begin{aligned}
\ddot{\psi} (I_X - I_Y) \sin \varphi \sin \theta \cos \varphi + \ddot{\theta} (I_X \cos^2 \varphi + I_Y \sin^2 \varphi) + P_\theta(\varphi, \psi, \theta, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) &= \\
= M_X^\ell \cos \varphi - M_Y^\ell \sin \varphi,
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
P_\theta(\varphi, \psi, \theta, \dot{\varphi}, \dot{\psi}, \dot{\theta}) &= \\
&= I_X \cos \varphi (\dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \sin \varphi + \dot{\psi} \dot{\varphi} \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \sin \varphi) + (I_Z - I_Y) \cos \varphi W_Y W_Z - \\
&\quad - I_Y \sin \varphi (\dot{\psi} \dot{\theta} \cos \theta \cos \varphi - \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin \theta \sin \varphi - \dot{\theta} \dot{\varphi} \cos \varphi) - (I_X - I_Z) \sin \varphi W_Z W_X .
\end{aligned}$$

Теперь выпишем систему с симметричной матрицей, учитывая выражения (5.26):

$$\begin{pmatrix} I_Z & I_Z \cos \theta & 0 \\ I_Z \cos \theta & \sin^2 \theta (I_X \sin^2 \varphi + I_Y \cos^2 \varphi) + I_Z \cos^2 \theta & (I_X - I_Y) \cos \varphi \sin \theta \\ 0 & (I_X - I_Y) \cos \varphi \sin \varphi \sin \theta & I_X \cos^2 \varphi + I_Y \sin^2 \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\psi} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} -P_\varphi + M_\zeta \cos \theta + \sin \theta (M_\xi \sin \psi - M_\eta \cos \psi) \\ -P_\varphi + M_\zeta \\ -P_0 + M_\xi \cos \psi + M_\eta \sin \psi \end{pmatrix}, \quad (5.30)$$

где

$$P_\varphi = -I_Z \dot{\psi} \dot{\theta} \sin \theta + (I_Y - I_X) W_X W_Y .$$

Теперь объединим две группы уравнений и запишем в систему дифференциальных уравнений, описывающую движения исполнительного устройства промышленного робота

$$\begin{pmatrix} \ddot{\xi}_0 \\ \ddot{\eta}_0 \\ \ddot{\zeta}_0 \\ \ddot{\varphi}_0 \\ \ddot{\psi}_0 \\ \ddot{\theta}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{l_i} (\xi_i^0 - \xi_i) \\ \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{l_i} (\eta_i^0 - \eta_i) - mg \\ \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{l_i} (\zeta_i^0 - \zeta_i) \\ -P_\varphi + M_\zeta \cos \theta + \sin \theta (M_\xi \sin \psi - M_\mu \cos \varphi) \\ -P_\psi + M_\zeta \\ -P_\theta + M_\xi \cos \psi + M_\eta \sin \psi \end{pmatrix}, \quad (5.31)$$

где

$$A = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_Z & I_Z \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_Z \cos \theta & \begin{pmatrix} \sin^2 \theta (I_X \sin^2 \varphi + \\ + I_Y \cos^2 \varphi + I_Z \cos^2 \theta) \end{pmatrix} & (I_X - I_Y) \cos \varphi \sin \varphi \sin \theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (I_X - I_Y) \cos \varphi \sin \varphi \sin \theta & I_X \cos^2 \varphi + I_Y \sin^2 \varphi \end{pmatrix}.$$

Примем положение устойчивого равновесия за начало отсчета обобщенных координат и за нулевой уровень потенциальной энергии. Рассмотрим малые движения системы около этого положения равновесия. Отклонение системы от положения равновесия при таком выборе начала отсчета будет определяться значениями обобщенных координат $z_i, i = 1, \dots, 6$.

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \xi_0 - \xi_0^H, \\
 z_2 &= \eta_0 - \eta_0^H, \\
 z_3 &= \zeta_0 - \zeta_0^H, \\
 z_4 &= \varphi - \varphi_0, \\
 z_5 &= \psi - \psi_0, \\
 z_6 &= \theta - \theta_0.
 \end{aligned}
 \tag{5.32}$$

Здесь

$\xi_0^H, \eta_0^H, \zeta_0^H$ – координаты центра масс исполнительного устройства в положении устойчивого равновесия;

$\varphi_0, \psi_0, \theta_0$ – углы Эйлера в начальный момент времени, соответствующий положению устойчивого равновесия исполнительного устройства.

Пологая обобщенные координаты $Z_i, i = 1, \dots, 6$ и обобщенные скорости малыми величинами, ограничимся в дифференциальных уравнениях (5.31) линейными членами относительно Z_i и \dot{Z}_i то есть отбросим в нелинейных дифференциальных уравнениях (5.31) члены содержащие квадрат и более высокие степени обобщенных координат и скоростей.

Сделав замену переменных (5.32), разложим левые и правые части системы (5.31) в ряды Тейлера по степеням малых обобщенных координат $Z_i, i = 1, \dots, 6$ и отбросим все члены выше первого порядка малости, то есть линеаризуем систему (5.31). получаем систему линейных дифференциальных урав-

нений вида:

$$A_0 \ddot{z} + D \dot{z} + E = 0, \quad (5.33)$$

где $z = (z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6)^T$,

A_0 – матрица масс;

D – матрица диссипации;

B – матрица жесткости.

$$E = \{E_K\}, \quad K = 1, \dots, 6;$$

$$D = \{D_{kj}\}, \quad k = 1, \dots, 6, \quad j = 1, \dots, 6; \quad (5.34)$$

$$B = \{B_{kj}\}, \quad k = 1, \dots, 6, \quad j = 1, \dots, 6.$$

В выражениях для компонент матриц B , D , E входят следующие параметры:

ξ_i^0, η_i^0 – координаты шести фиксированных точек на плоскости $\zeta O \eta$;

x_i, y_i, z_i – относительные координаты шести точек выходного звена;

k_i – жесткости;

b_i – сопротивления;

m – масса тела;

$\xi_0^H, \eta_0^H, \zeta_0^H$ – координаты центра масс в начальный момент времени;

$\psi_0, \varphi_0, \theta_0$ – углы Эйлера в начальный момент времени.

Можно убедиться, что матрица B и D симметричные, то есть

$$B_{ij} = B_{ji}; D_{ij} = D_{ji}; i, j = 1, \dots, 6.$$

В положении равновесия $E_i = 0, i = 1, \dots, 6$.

Из условий можно определить параметры $\xi_0^H, \eta_0^H, \zeta_0^H, \varphi_0, \psi_0, \theta_0$

соответствующие положению системы.

Для определения собственных частот колебаний консервативной систе-

мы в окрестности положения равновесия положим в (5.33) $b_i = 0$, $i = 1, \dots, 6$.

В этом случае система (5.33) приобретает вид:

$$A_0 \ddot{z} + Bz = 0; \quad (5.35)$$

$$z = x e^{i\omega t}. \quad (5.36)$$

Решение (5.35) ищем в виде (5.36), где ω называется собственной частотой колебаний, x – амплитуда колебаний.

Подставляя (5.36) в (5.35), получаем:

$$(-\omega^2 A_0 + B)x = 0. \quad (5.37)$$

Система алгебраических уравнений (5.37) имеет нулевое решение x , если

$$|-\omega^2 A_0 + B| = 0. \quad (5.38)$$

Число ω обращающее уравнение (5.38) в тождество является собственной частотой колебаний консервативной системы, описываемой системой дифференциальных уравнений (5.35).

Нахождение корней уравнения (5.38) сводится к обобщенной проблеме собственных значений для действительной несимметричной матрицы вида $A_0^{-1} B$, где A_0 и B симметричные действительные матрицы, A_0 — положительно определенная.

Для определения собственных частот колебаний консервативной системы около положения равновесия написана расчётная компьютерная программа.

Для определения собственных частот колебаний и коэффициентов демпфирования неконсервативной системы рассматривается система дифференциальных уравнений вида

$$A_0 \dot{z} + D\dot{z} + Bz = 0, \quad (5.39)$$

где A_0 , D и B имеют вид (5.34).

Решение системы (5.39) будем искать также в виде (5.36), но в этом случае $w = w_R + iw_I$ – искомая комплексная собственная частота. Физически w_R представляет собой частоту w_I – коэффициент демпфирования собственных колебаний. Подставляя (5.36) в (5.39) получаем систему алгебраических уравнений

$$\left(-w^2 A - iwD + B\right)x = 0,$$

которая имеет не нулевое решение, если предположить

$$\left| \left(w^2 A - iwD + B\right) = 0 \right|. \quad (5.40)$$

Для определения уравнения (5.40) написана программа на языке ПАСКАЛЬ, использующая стандартные подпрограммы HSBG и FTEIG.

Расчеты для систем с диссипацией проводились для тех же линейных и физических параметров, что и в случае консервативной системы [191].

5.3. Анализ расчетов многостепенных виброзащитных модулей на ЭВМ

Расчеты проводились в окрестности положения равновесия исполнительного устройства, изображенного на рис. 5.3, то есть полагалось, что точки ИУ M_i , $i=1\dots6$ в системе координат $O_1 xuz$ имеют следующие координаты: M_1 (0,043, 0,025), M_2 (0, 0, 0,05), M_3 (0,043, 0, -0,025), M_4 (-0,043, 0, -0,025), M_5 (0, 0, 0), M_6 (-0,043, 0, 0,025), то есть точка M_5 находится в центре, а остальные точки в углах правильного шестиугольника со стороной 0,05м [201].

На плоскости $\xi O\eta$ точки A_i ($i=1,\dots,6$) в неподвижной системе координат имеют координаты A_1 (0, 0, 0), A_2 (-0,043, 0,025, 0), A_3 (0, 0, 0), A_4 (0,043, 0,075, 0), A_5 (-0,043, 0,075, 0), A_6 (0, 0,1, 0). Таким образом, точки находятся в вершинах правильного шестиугольника со стороной 0,05 м на плоскости $\xi O\eta$, точки A_1 и A_3 совпадают с точкой O , точка A_6 расположена на оси $O\eta$. Поместим в точки A_i , M_i , $i=1\dots6$ шарниры, весом которых при расчетах

пренебрегаем и соединим указанные точки упругими и вязкими элементами. При этом точка A_i соединяется с точкой M_i пружиной с коэффициентом упругости K_i и демпфером с коэффициентом сопротивления b_i .

Полагаем $K_i = 800$ Н/м, $b_i = 10$ нс/м, $i = 1, \dots, 6$.

Обозначим $l_i = A_i M_i$, $i = 1, \dots, 6$.

Положим моменты инерции модуля относительно осей O_x , O_y , O_z равными $I_z = 5 \cdot 10^{-3}$ кгм², $I_y = I_x = 9 \cdot 10^{-3}$ кгм², массу ИУ примем $m = 1,4$ кг.

Заметим, что в положении равновесия ℓ -координатного модуля, изображенного на рис. 5.3. Будем считать что на рис. 5.3 изображено положение равновесия, в котором стержни $A_i M_i$ находятся в недеформированном состоянии.

$(\xi_i^0, \eta_i^0, \zeta_i^0)$ – координаты точек A_i на плоскости $(\zeta\eta)$ равны:

$$\zeta_i^0 = 0, \quad i = 1, \dots, 6;$$

$$\xi_1^0 = \xi_3^0 = \xi_6^0 = 0, \quad \xi_2^0 = -0,043, \quad \xi_4^0 = 0,043, \quad \xi_5^0 = -0,043,$$

$$\eta_1^0 = \eta_3^0 = 0, \quad \eta_2^0 = 0,025, \quad \eta_4^0 = \eta_5^0 = 0,075, \quad \eta_6^0 = 0,1,$$

для конструкции, изображенной на рис. 5.3.

$$x_1 = x_2 = 0,043 \text{ м}, \quad x_2 = x_5 = 0, \quad x_4 = x_6 = -0,043,$$

$$y_i = 0, \quad i = 1, \dots, 6,$$

$$z_1 = z_6 = 0,025, \quad z_2 = 0,05, \quad x_3 = z_4 = -0,025 \text{ м}, \quad z_5 = 0.$$

Расчеты проводились в окрестности положения равновесия виброзащитного модуля, изображенного на рис. 5.3, для линейных и физических параметров, перечисленных выше. Для этих значений параметров собственные частоты оказались равными:

$$\omega_R^1 = 1,317 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_R^2 = 3,665 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_R^3 = 8,449 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_R^4 = 20,99 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_R^5 = 35,18 \text{ с}^{-1};$$

$$\omega_R^6 = 51,31 \text{ с}^{-1}.$$

Для коэффициентов демпфирования получены следующие значения:

$$\omega_1^1 = 0,01076 ; \quad \omega_1^4 = 2,801 ;$$

$$\omega_1^2 = 0,08397 ; \quad \omega_1^5 = 8,152 ;$$

$$\omega_1^3 = 0,4476 ; \quad \omega_1^6 = 18,62 .$$

На рис. 5.4÷5.25 показаны зависимости частот колебаний системы от различных параметров системы. На рис. 5.4 показана зависимость частот от массы m исполнительного устройства, которая оказалась монотонной. При возрастании массы частоты убывают, что ведет к уменьшению жесткости конструкции. Массу модуля необходимо оптимизировать в соответствии с конструктивными возможностями. На рис. 5.5÷5.10 представлены монотонные зависимости шести собственных частот от коэффициентов жесткости K_i , которые изменяются в пределах от 400 до 1200 Н/м. При возрастании K_i частоты не убывают.

На рис. 5.11÷5.16 представлены зависимости собственных частот от длин тяг l_i . Имеет место максимум для ω_R^6 , ω_R^5 , ω_R^4 и минимум для ω_R^3 , ω_R^2 , ω_R^1 при изменении l_3 (рис. 5.13) и максимум для всех ω_R при изменении l_6 (рис. 5.16). Зависимость собственных частот колебаний от моментов инерции I_x , I_y , I_z (рис. 5.17÷5.19) монотонно убывающие.

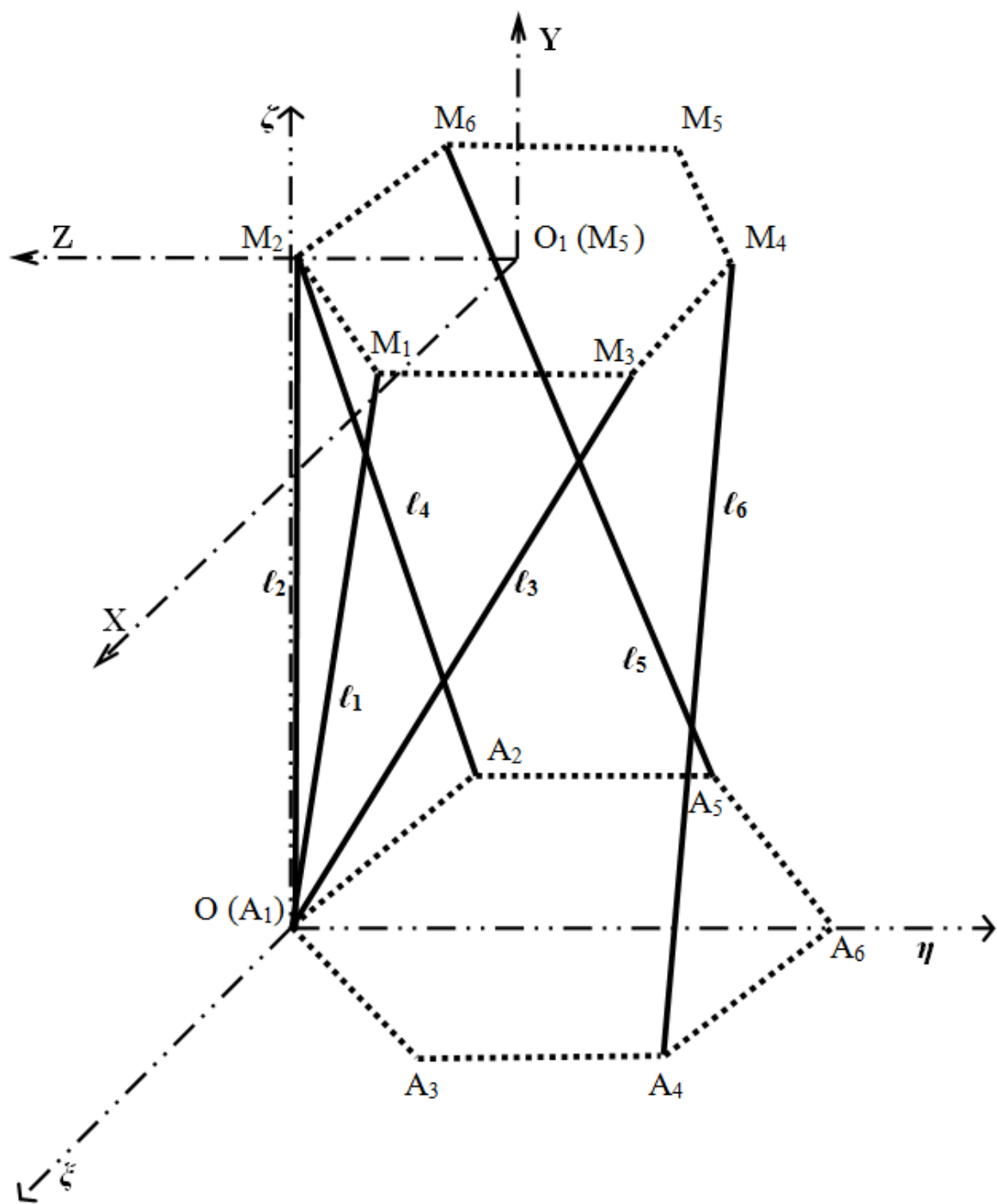


Рис. 5.3. Схема виброзащитного устройства

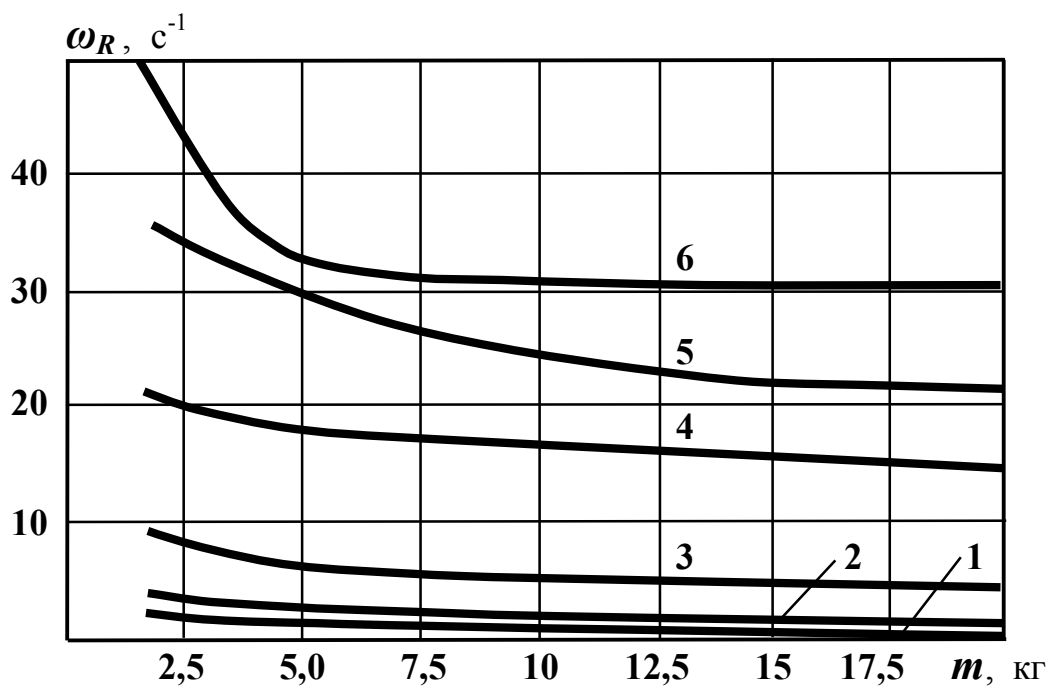


Рис. 5.4. Зависимость собственных частот от массы m

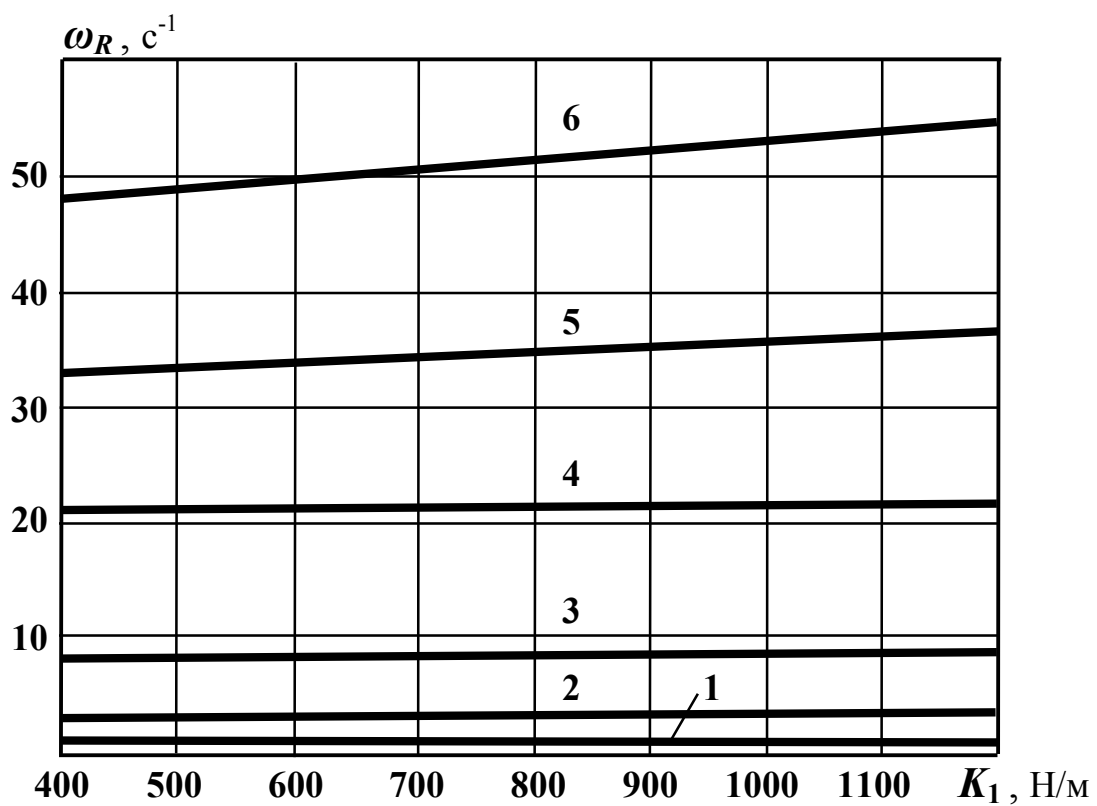


Рис. 5.5. Зависимость собственных частот от коэффициента жесткости K_1

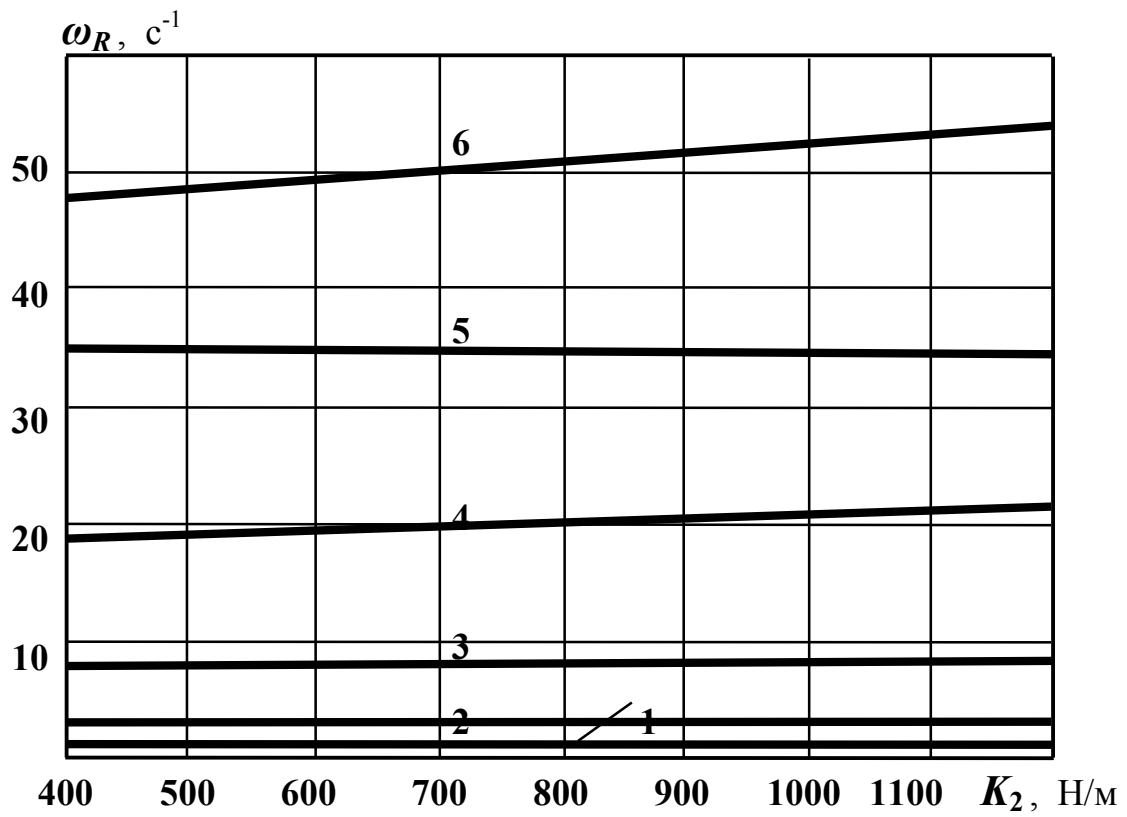


Рис. 5.6. Зависимость собственных частот от коэффициента жесткости K_2

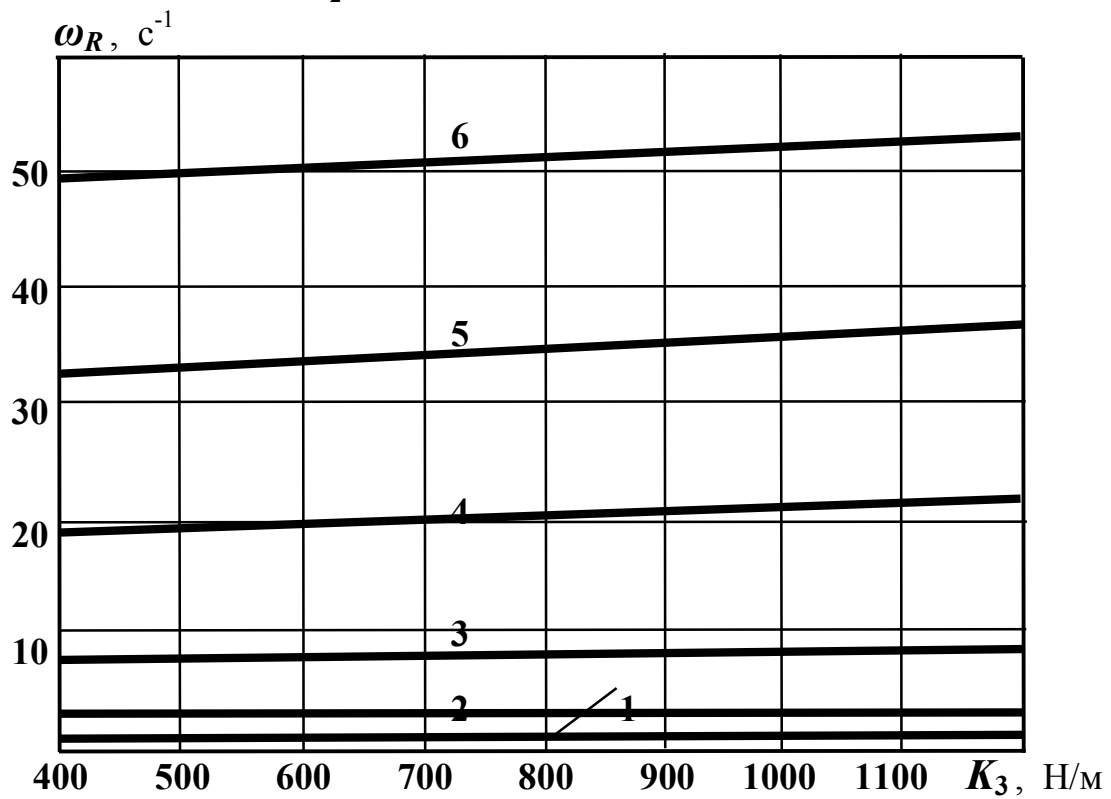


Рис. 5.7. Зависимость собственных частот от коэффициента жесткости K_3

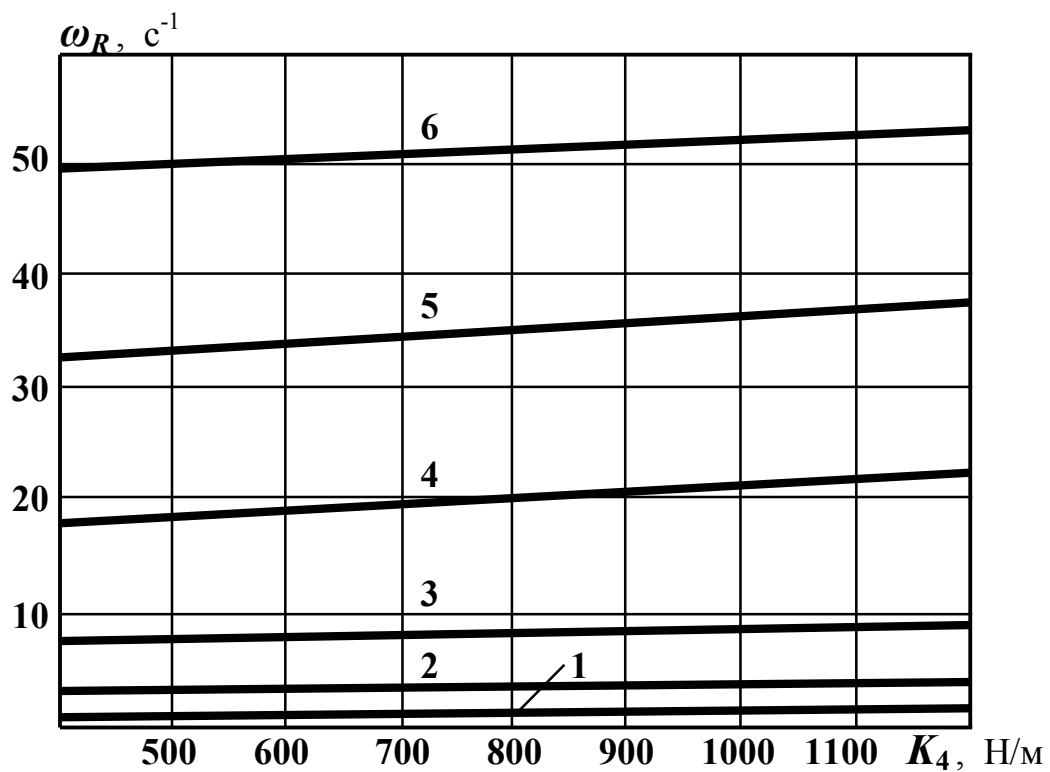


Рис. 5.8. Зависимость собственных частот от коэффициента жесткости K_4

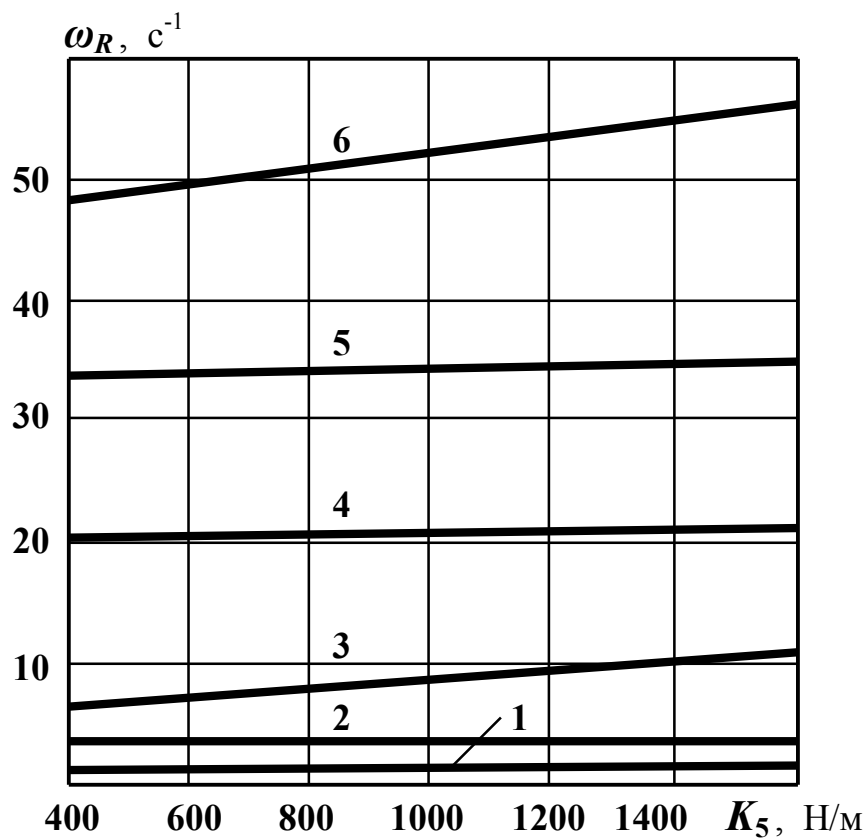


Рис. 5.9. Зависимость собственных частот от коэффициента жесткости K_5

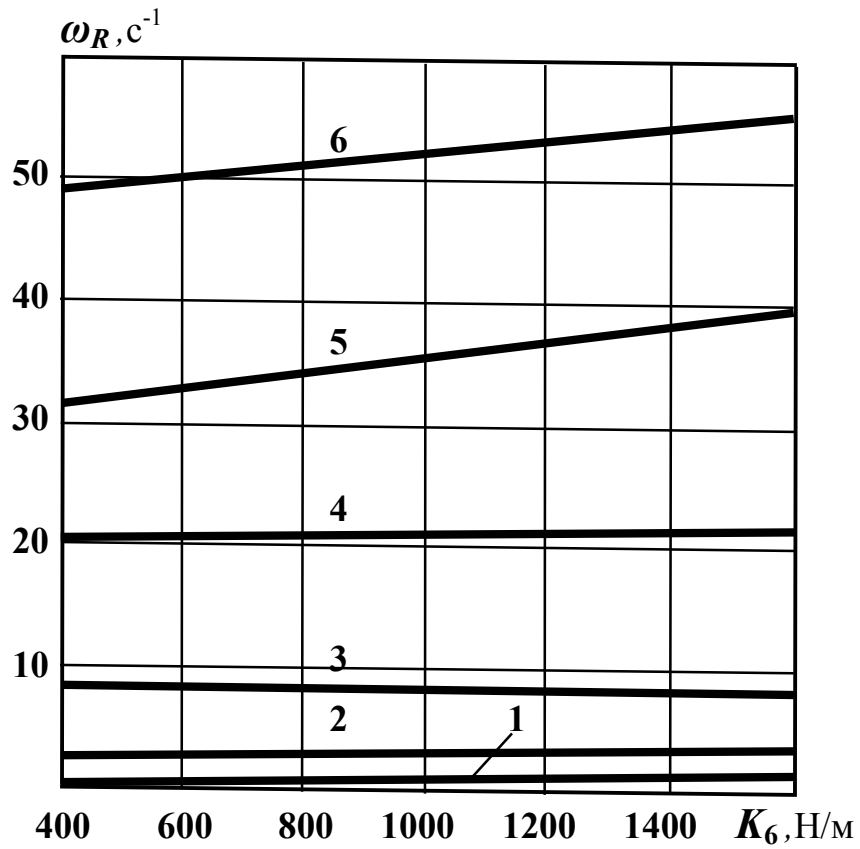


Рис. 5.10. Зависимость собственных частот от коэффициента жесткости K_6

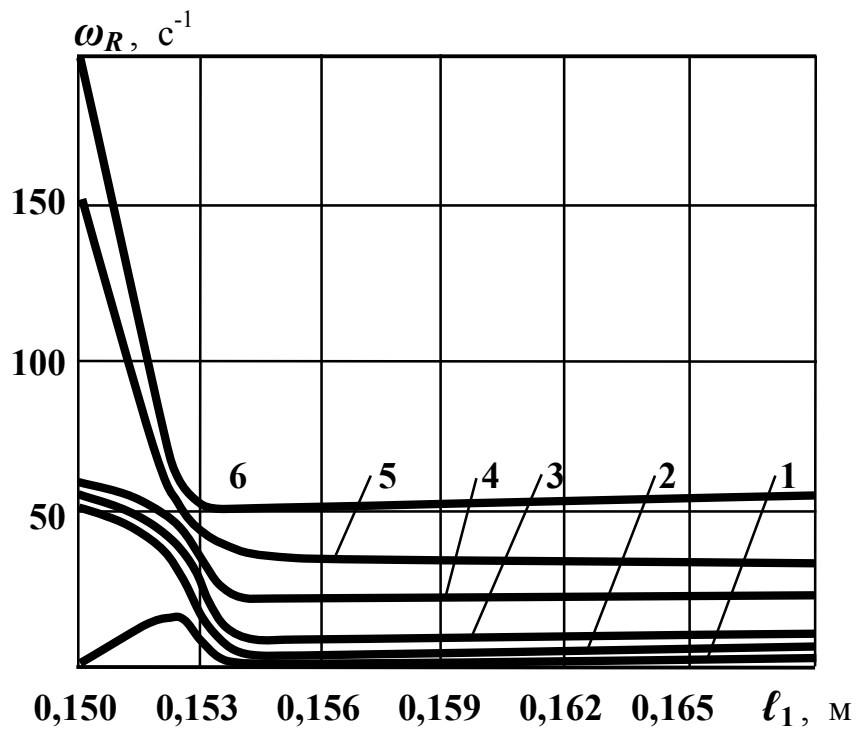


Рис. 5.11. Зависимость собственных частот от длины l_1

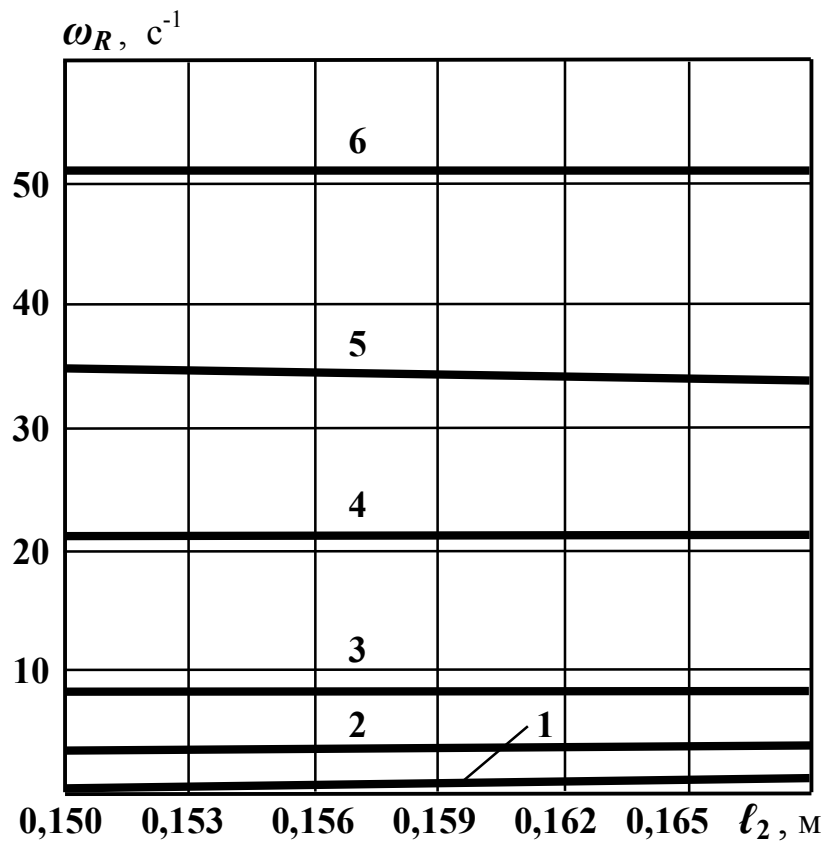


Рис. 5.12. Зависимость собственных частот от длины ℓ_2

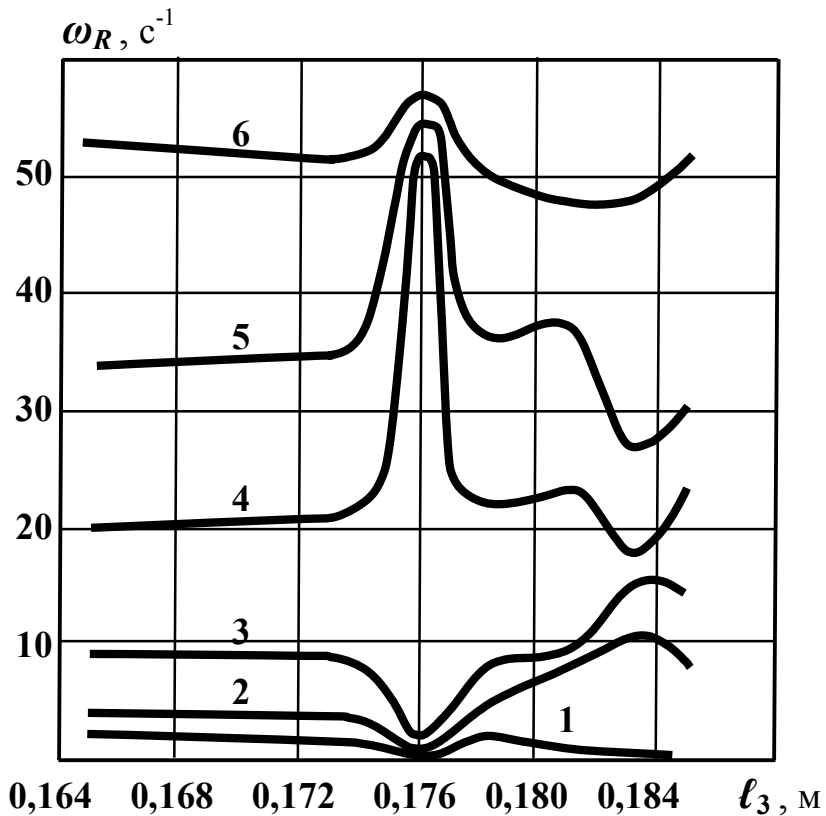


Рис. 5.13. Зависимость собственных частот от длины ℓ_3

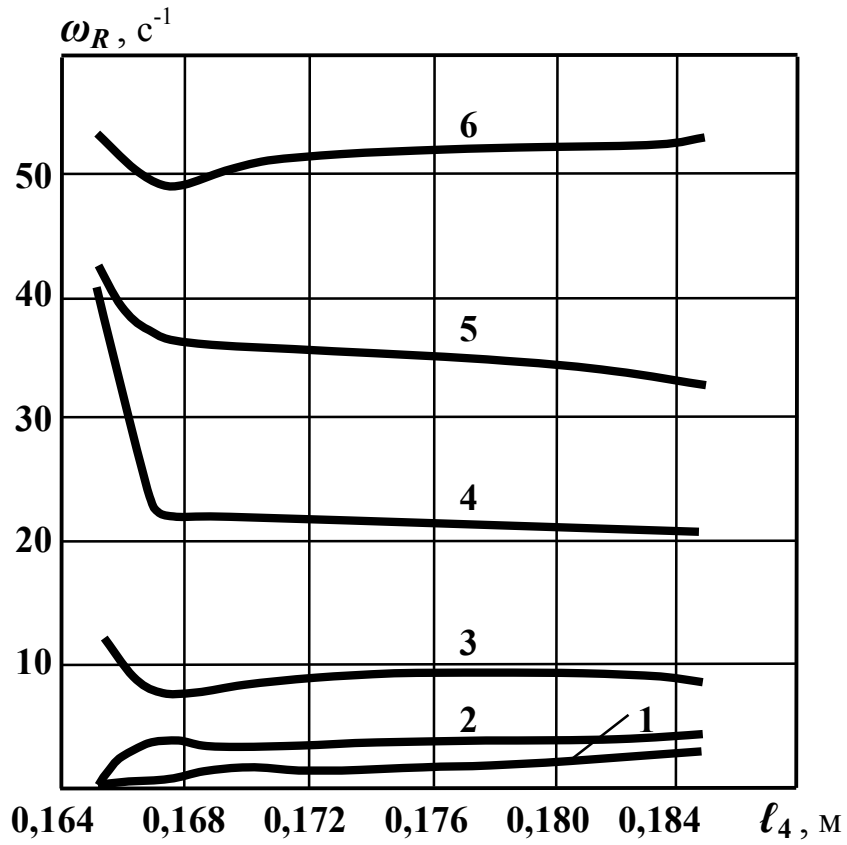


Рис. 5.14. Зависимость собственных частот от длины ℓ_4

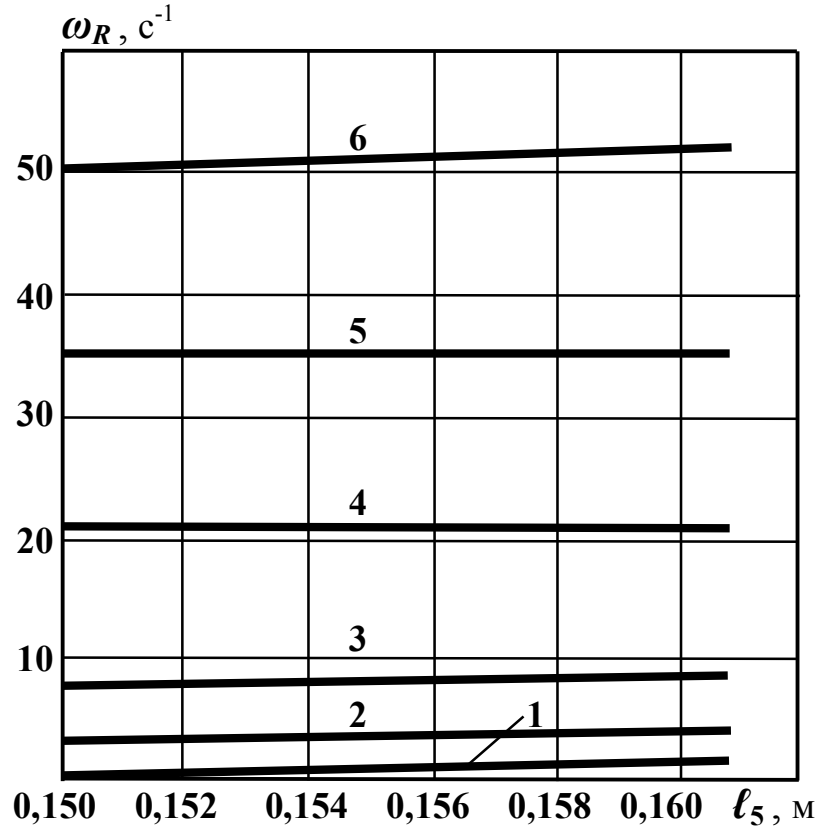


Рис. 5.15. Зависимость собственных частот от длины ℓ_5

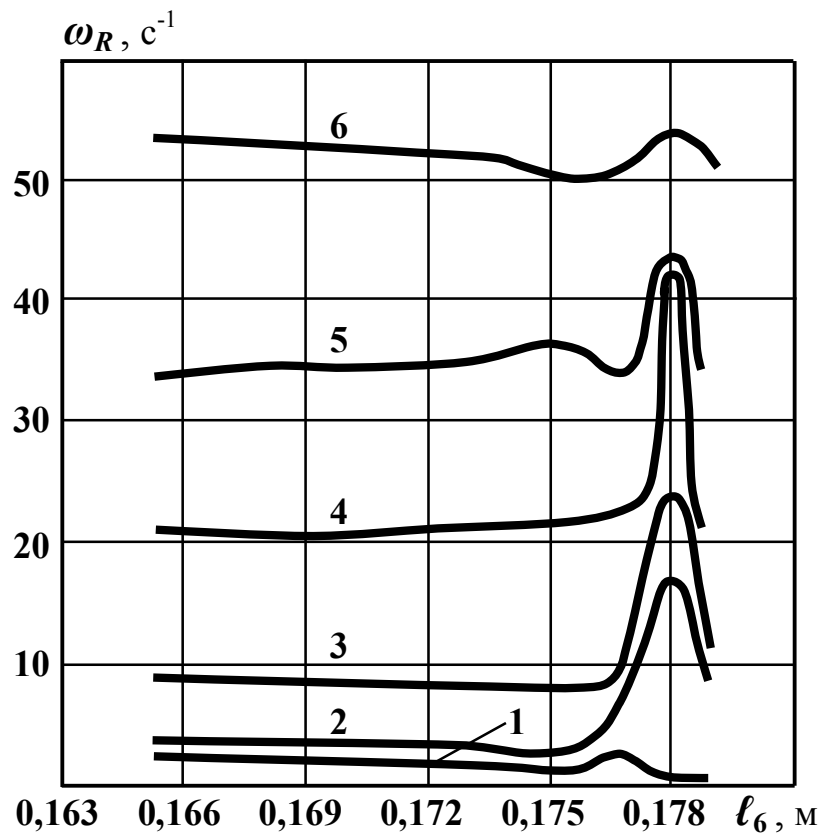


Рис. 5.16. Зависимость собственных частот от длины l_6

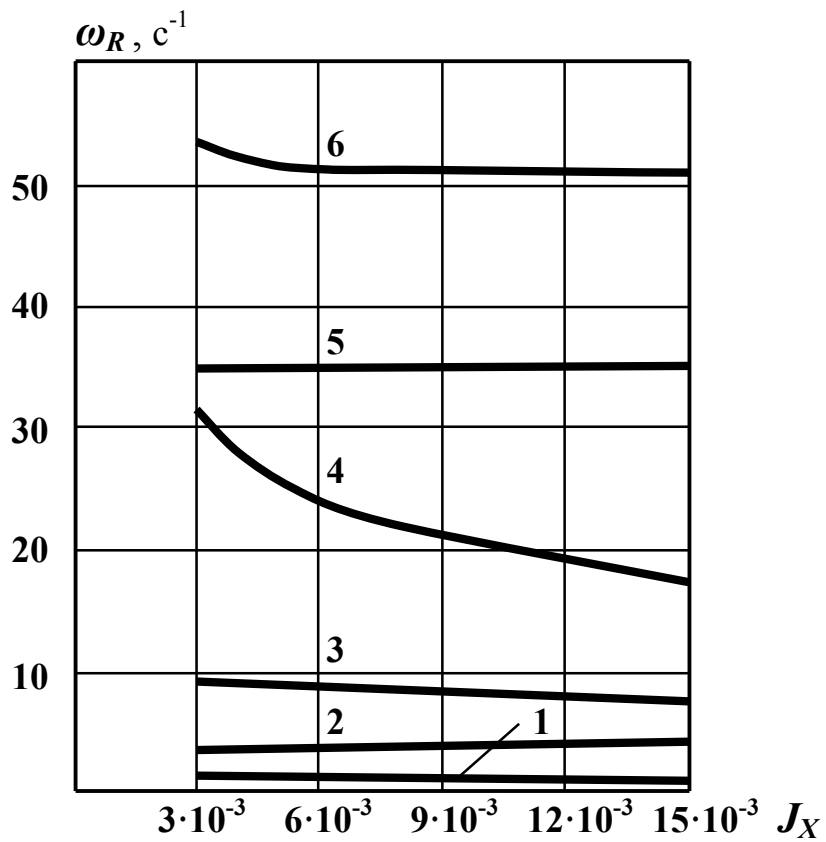


Рис. 5.17. Зависимость собственных частот от момента инерции J_X

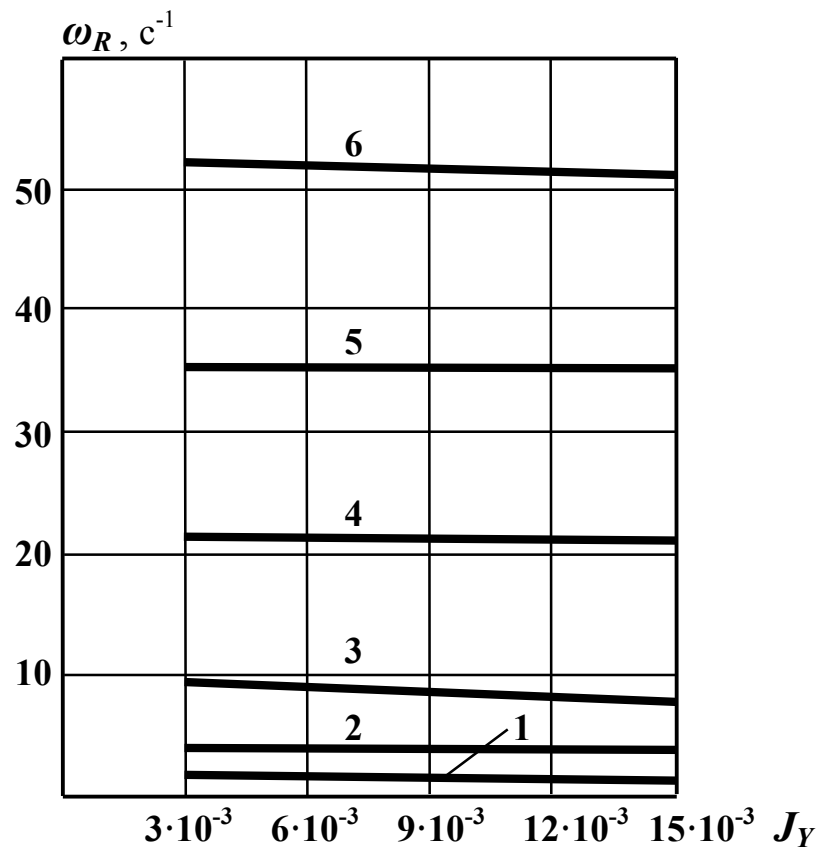


Рис. 5.18. Зависимость собственных частот от момента инерции J_Y

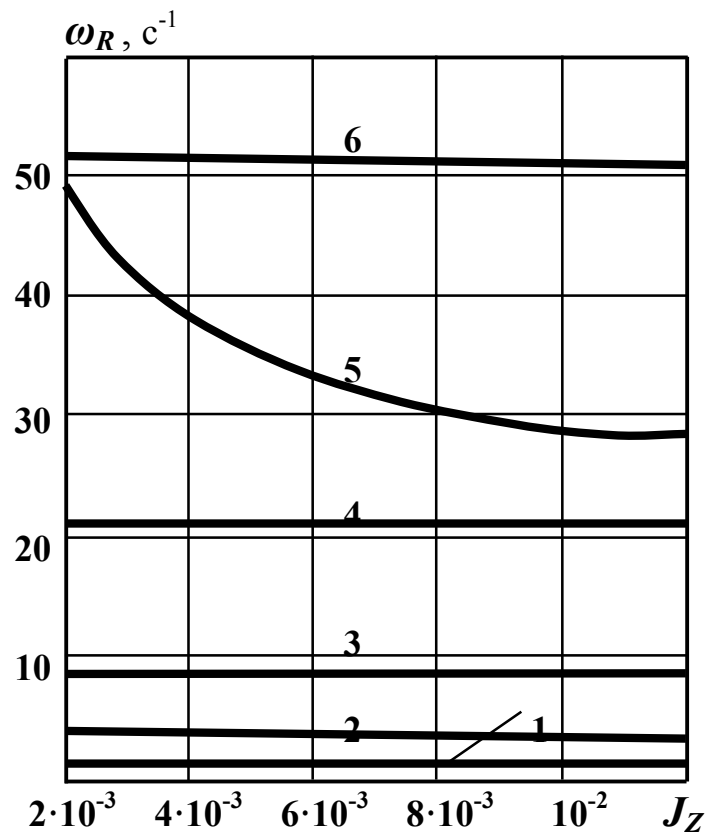


Рис. 5.19. Зависимость собственных частот от момента инерции J_Z

На рис. 5.20÷5.25 представлены зависимости собственных частот колебаний от коэффициентов сопротивления b_i , $i=1, \dots, 6$. Практически во всех случаях имеет место убывание частот с увеличением b_i .

На рис. 5.26÷5.46 представлены зависимости коэффициентов демпфирования от параметров системы.

Коэффициенты демпфирования ω_I^k , $k=1, \dots, 6$ практически не изменяются при изменении k_i , $i=1, \dots, 6$ (рис. 5.29÷5.34).

Более сложные зависимости ω_I^k получены при изменении ℓ_i , $i=1, \dots, 6$ (рис. 5.32÷5.37). Так, в частности, при изменении ℓ_3 (рис. 5.37) коэффициенты демпфирования ℓ_I^k имеют ярко выраженные минимумы. Аналогично, при изменении ℓ_6 (рис. 5.40).

Зависимости коэффициентов демпфирования от моментов инерции J_x , J_y , J_z монотонно убывающие (рис. 5.38 ÷ 5.40). А зависимости коэффициентов демпфирования ω_I^k , $k=1, \dots, 6$ от коэффициентов сопротивления b_i , $i=1, \dots, 6$ имеют сложный характер (рис. 5.41÷5.46).

Полученные сведения о частотах колебания и коэффициентах демпфирования позволяют избежать опасных резонансных колебаний в системе и построить уравнения вынужденных колебаний модуля.

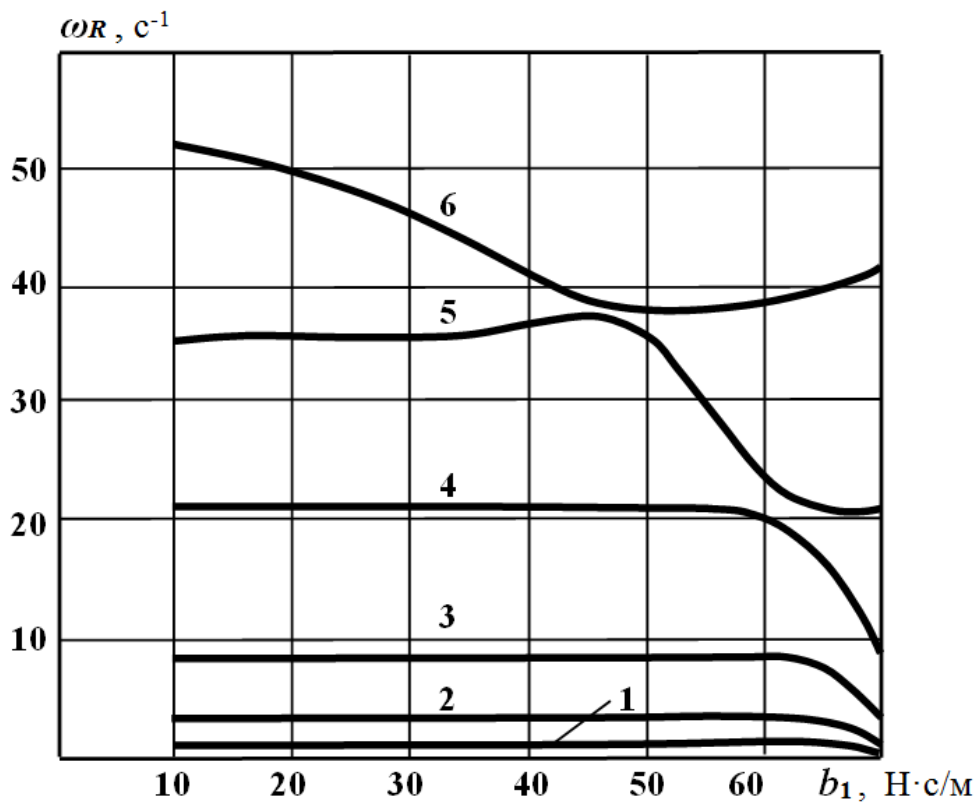


Рис. 5.20. Зависимость собственных частот затухающих колебаний от коэффициента сопротивления b_1

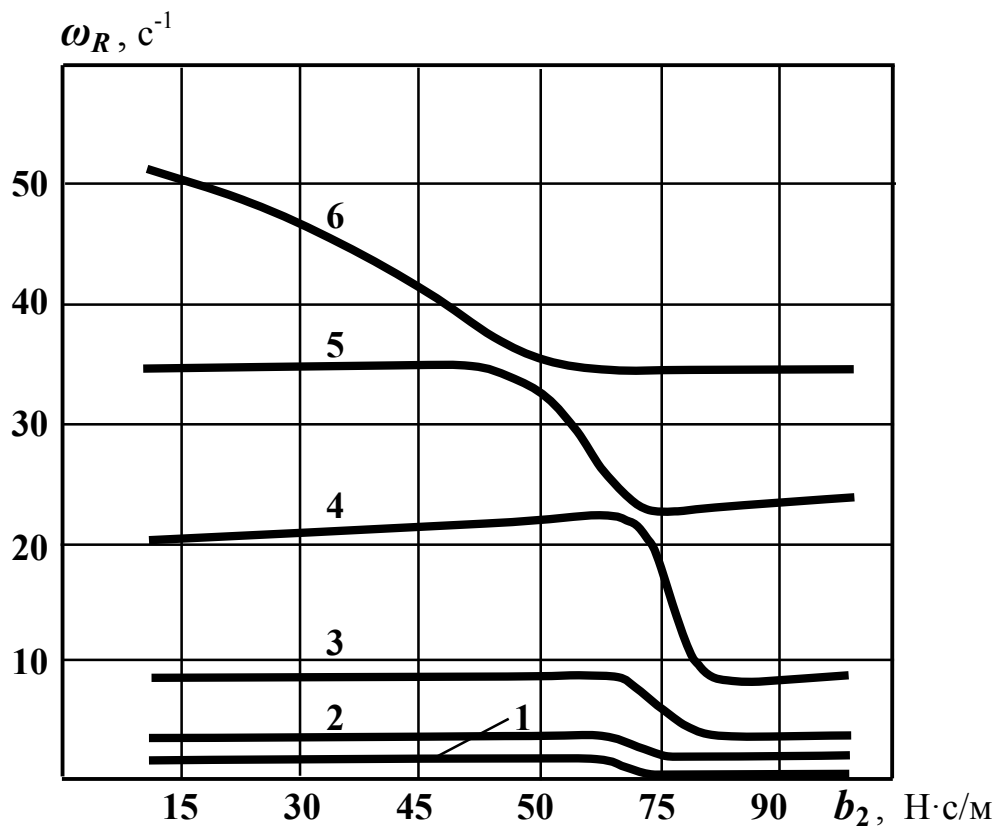


Рис. 5.21. Зависимость собственных частот затухающих колебаний от коэффициента сопротивления b_2

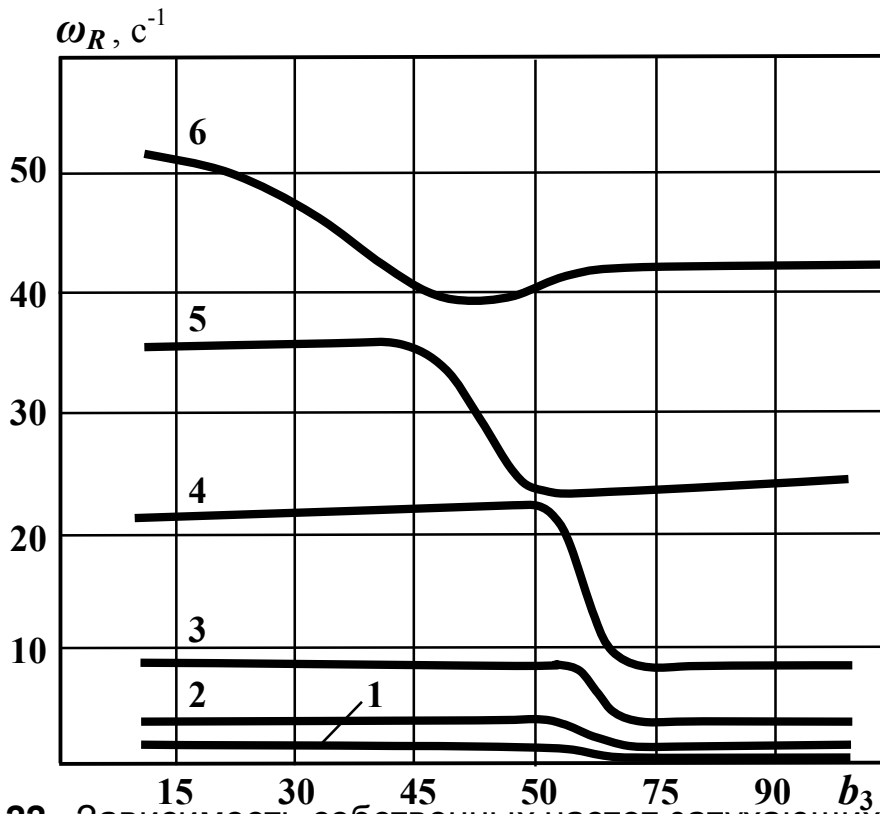


Рис. 5.22. Зависимость собственных частот затухающих колебаний от коэффициента сопротивления b_3

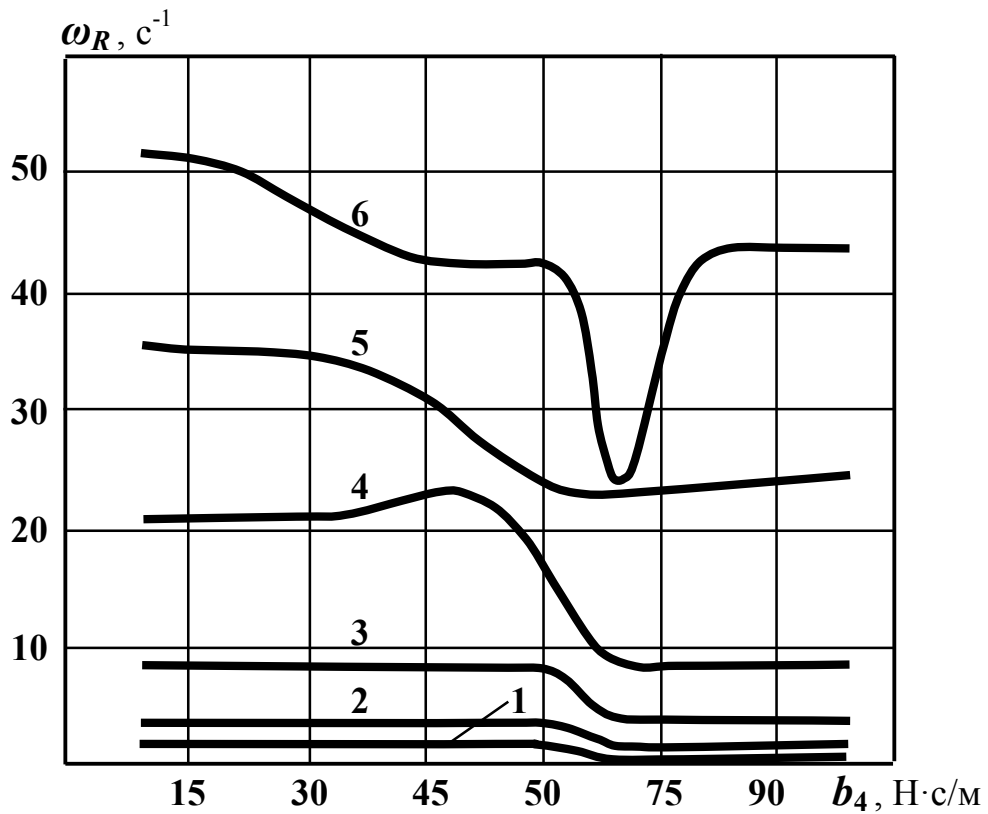


Рис. 5.23. Зависимость собственных частот затухающих колебаний от коэффициента сопротивления b_4

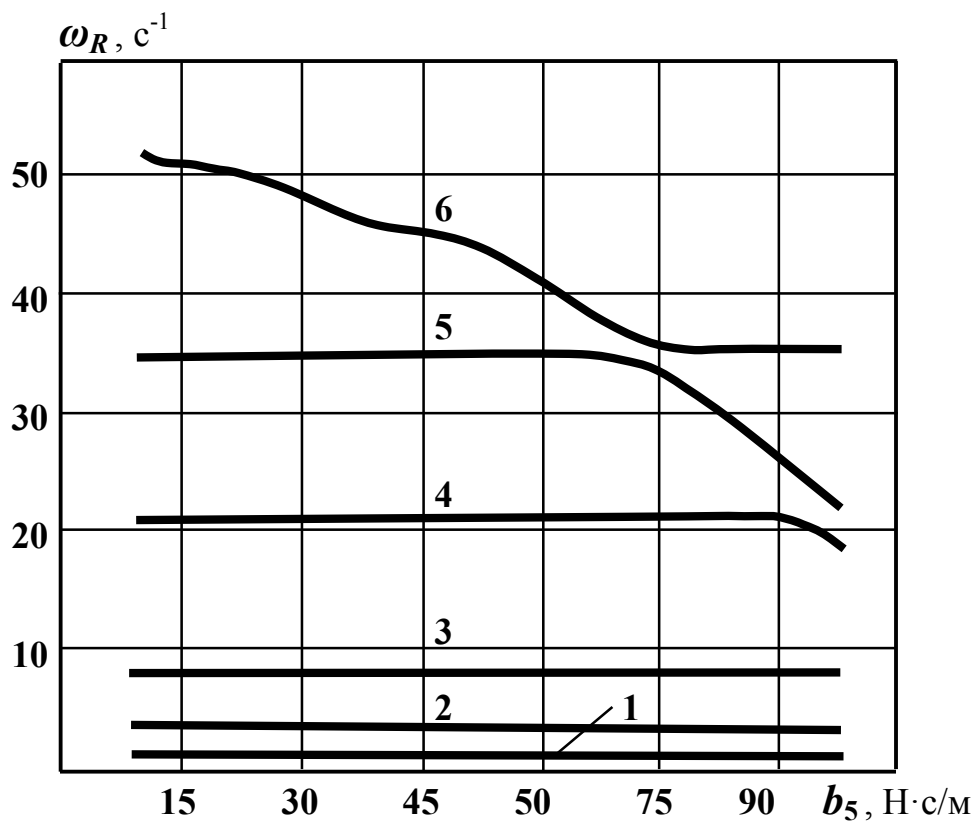


Рис. 5.24. Зависимость собственных частот затухающих колебаний от коэффициента сопротивления b_5

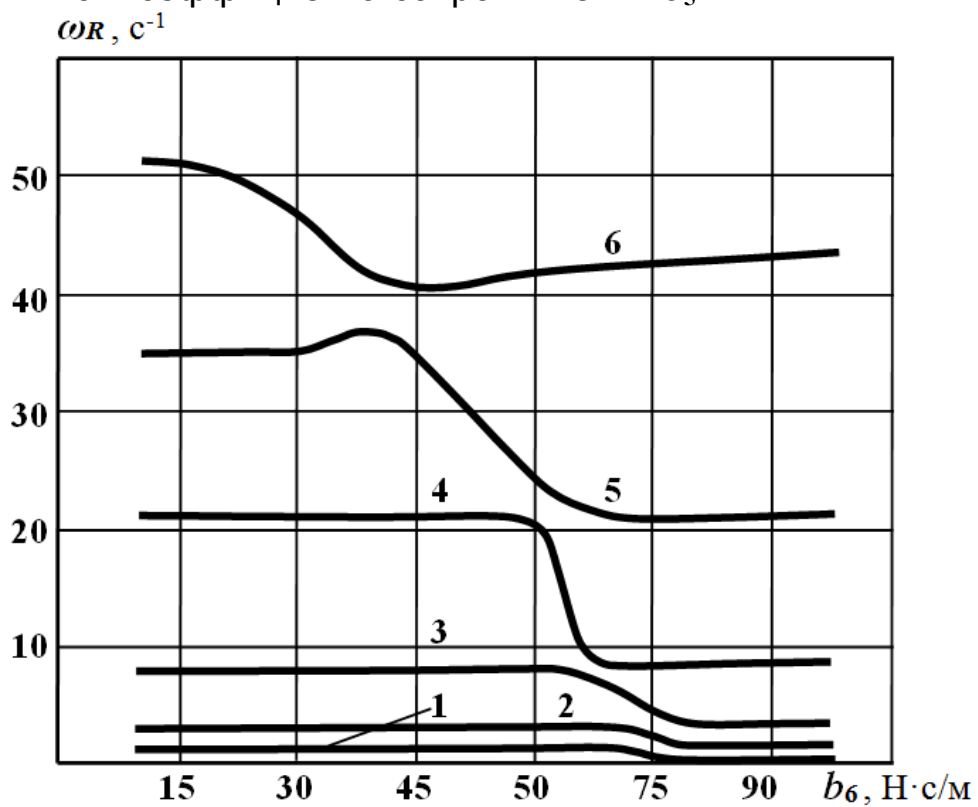


Рис. 5.25. Зависимость собственных частот затухающих колебаний от коэффициента сопротивления b_6 .

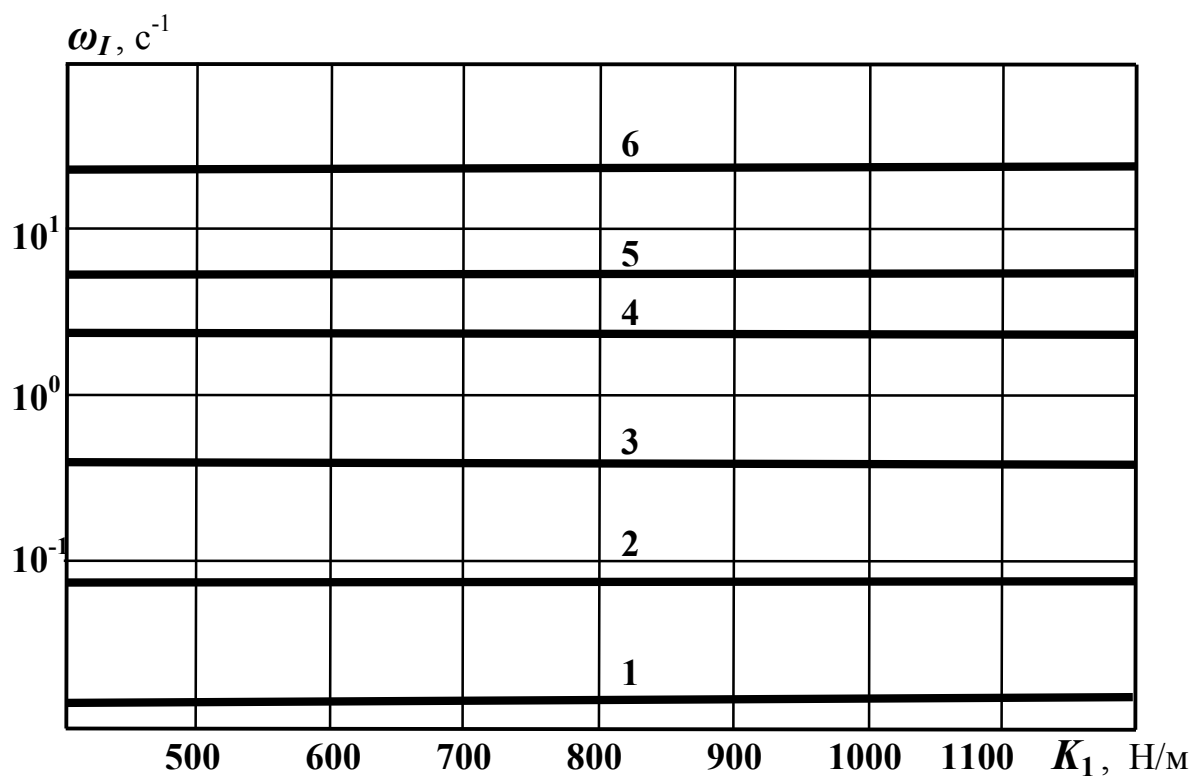


Рис. 5.26. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента жесткости K_1

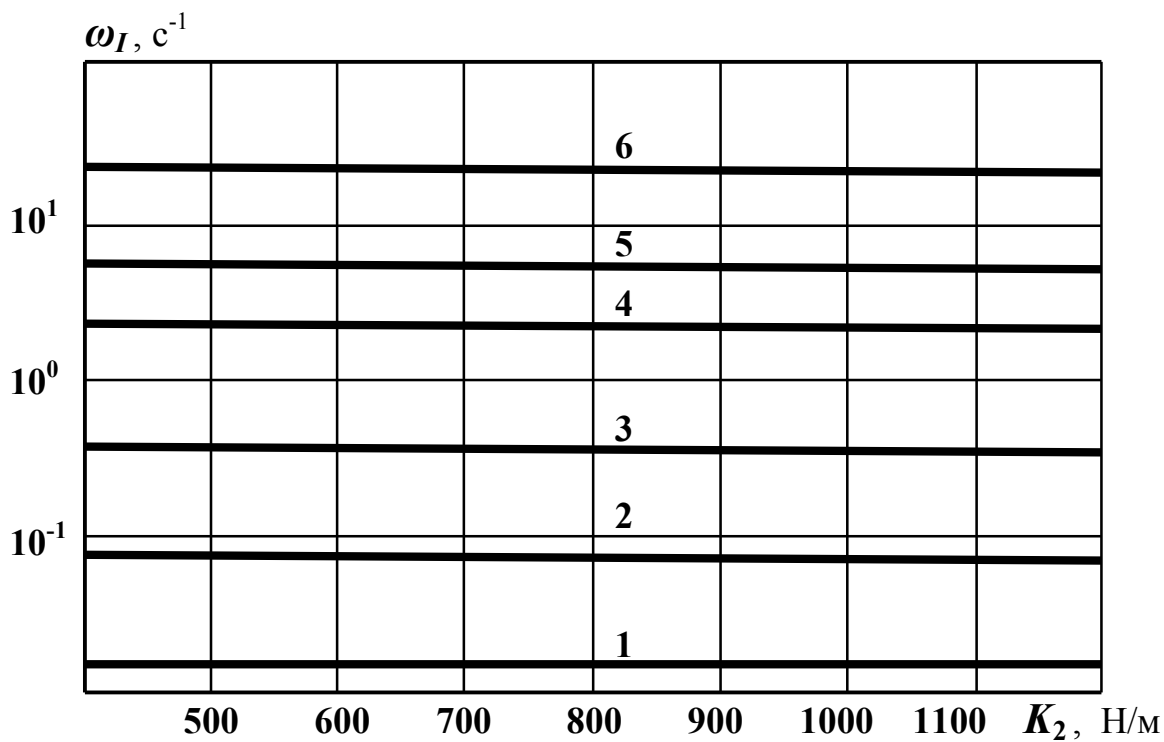


Рис. 5.27. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента жесткости K_2

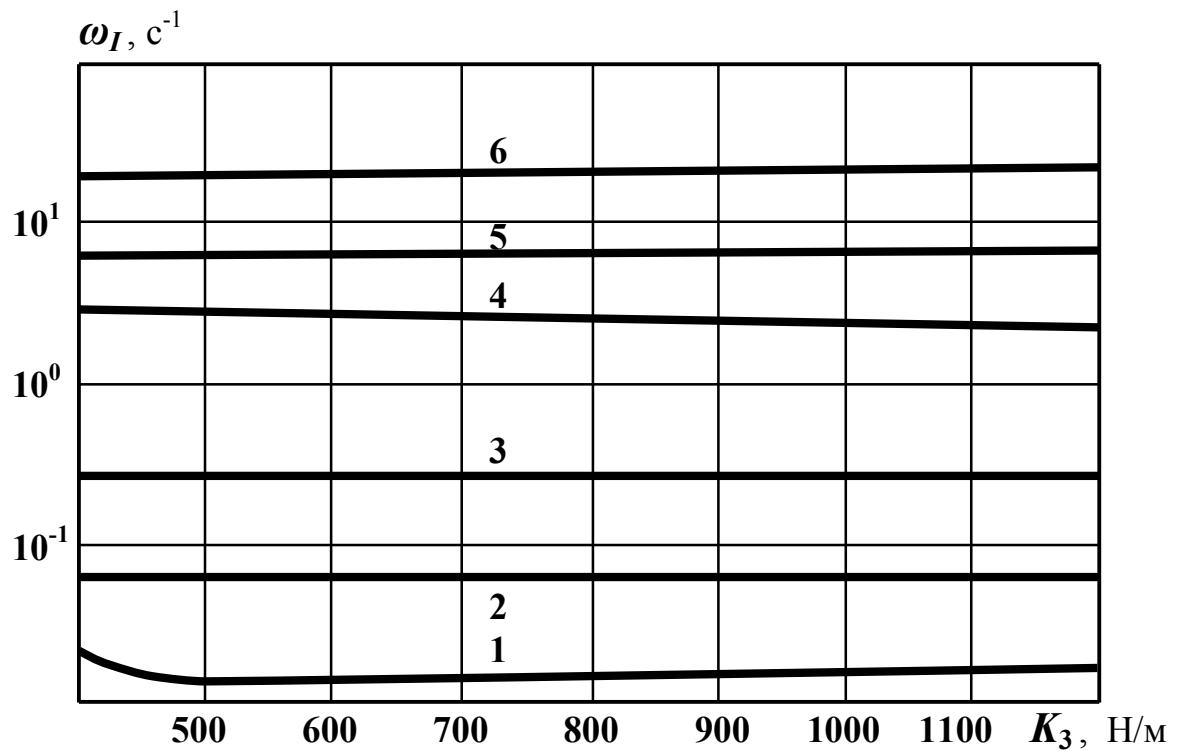


Рис. 5.28. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента жесткости K_3

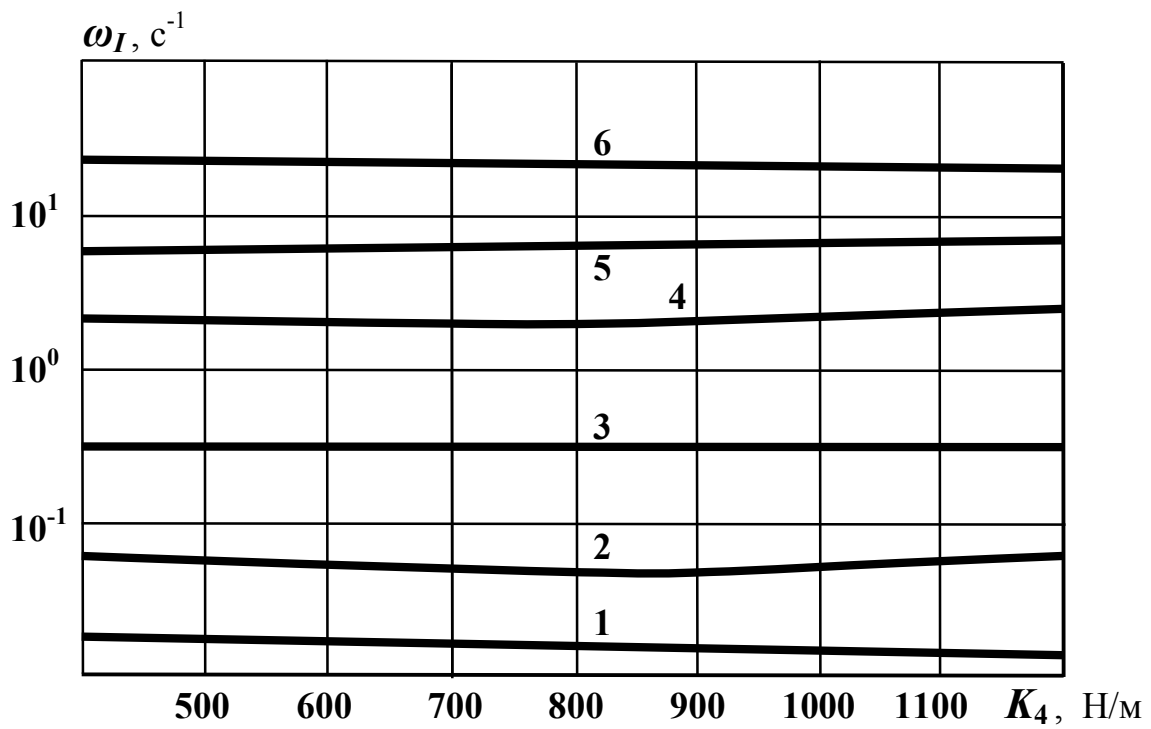


Рис. 5.29. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента жесткости K_4

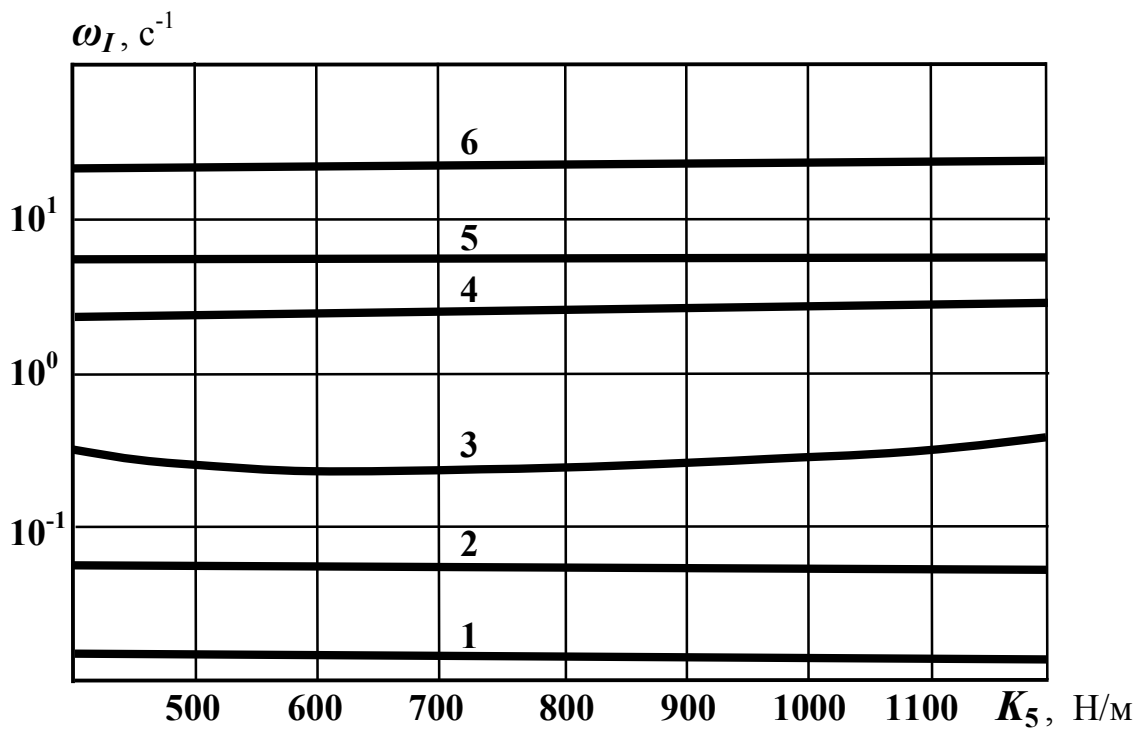


Рис. 5.30. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента жесткости K_5

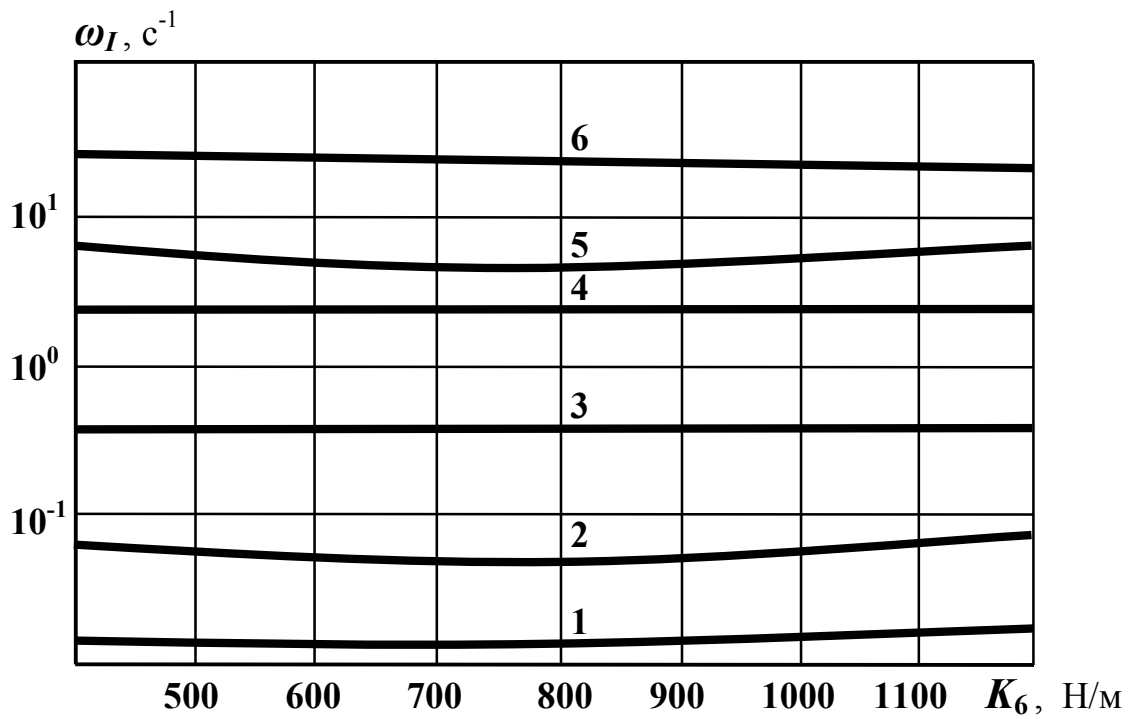


Рис. 5.31. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента жесткости K_6

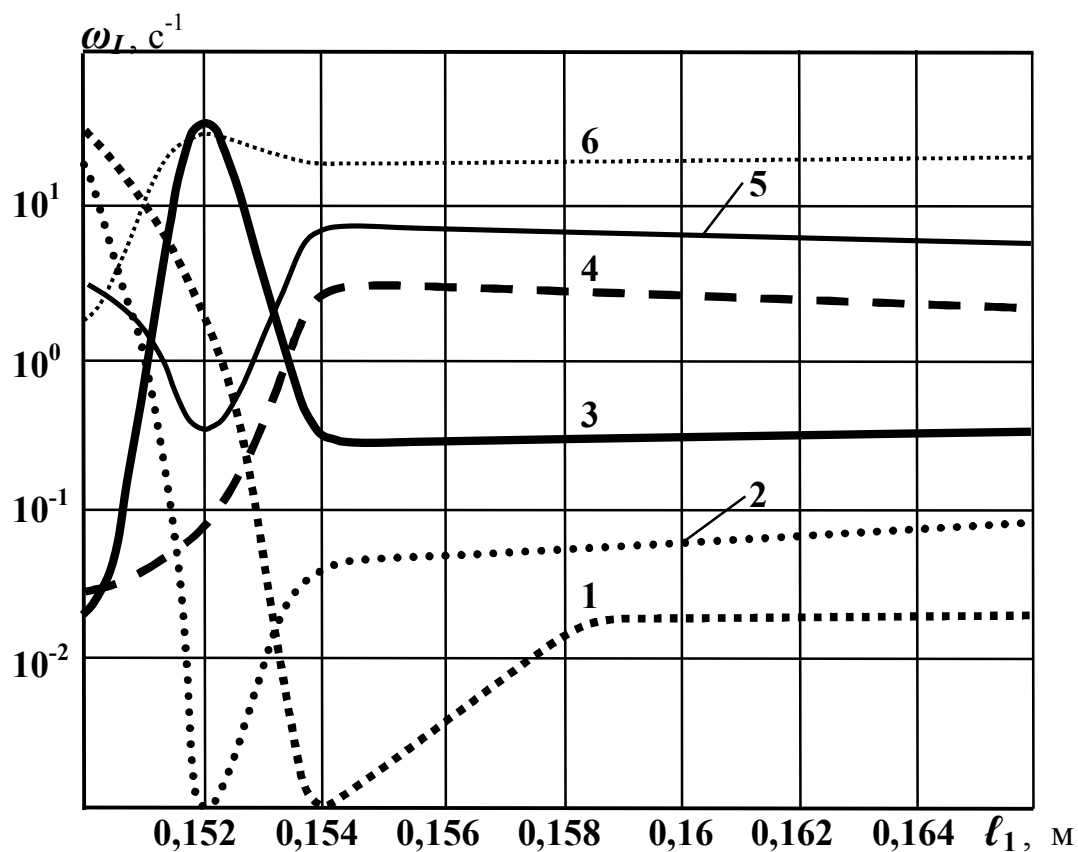


Рис. 5.32. Зависимость коэффициентов демпфирования от длины ℓ_1

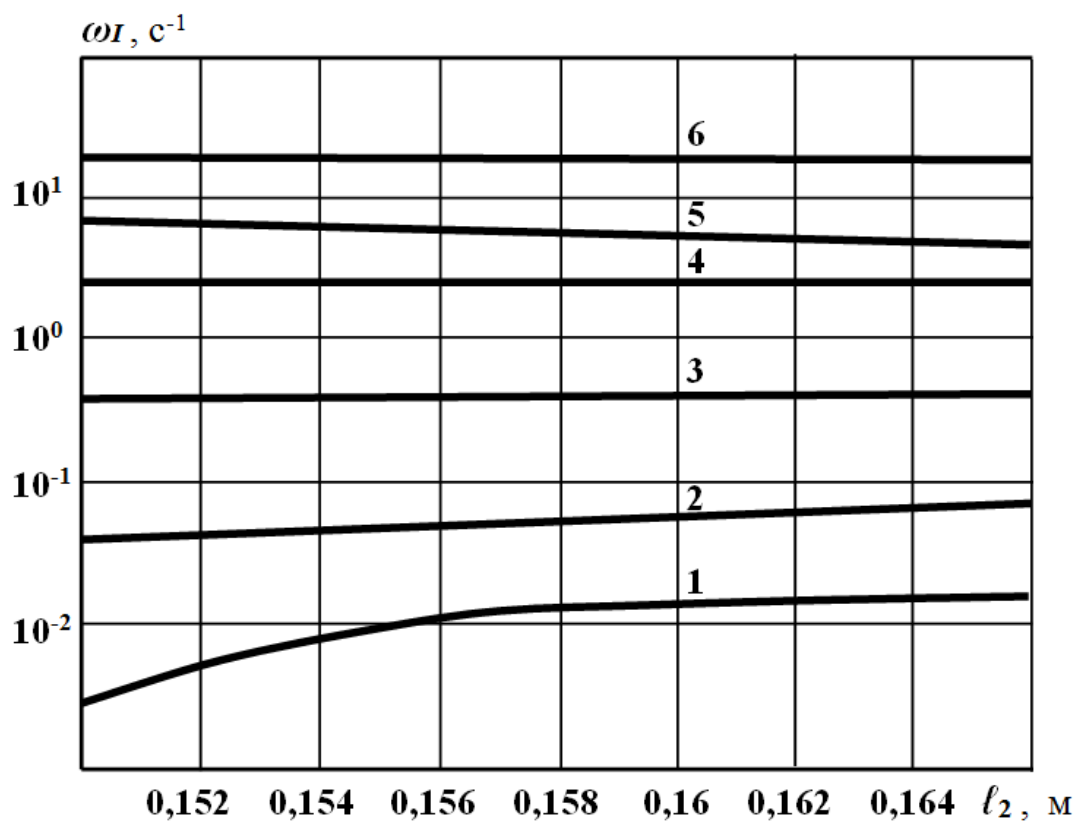


Рис. 5.33. Зависимость коэффициентов демпфирования от длины ℓ_2

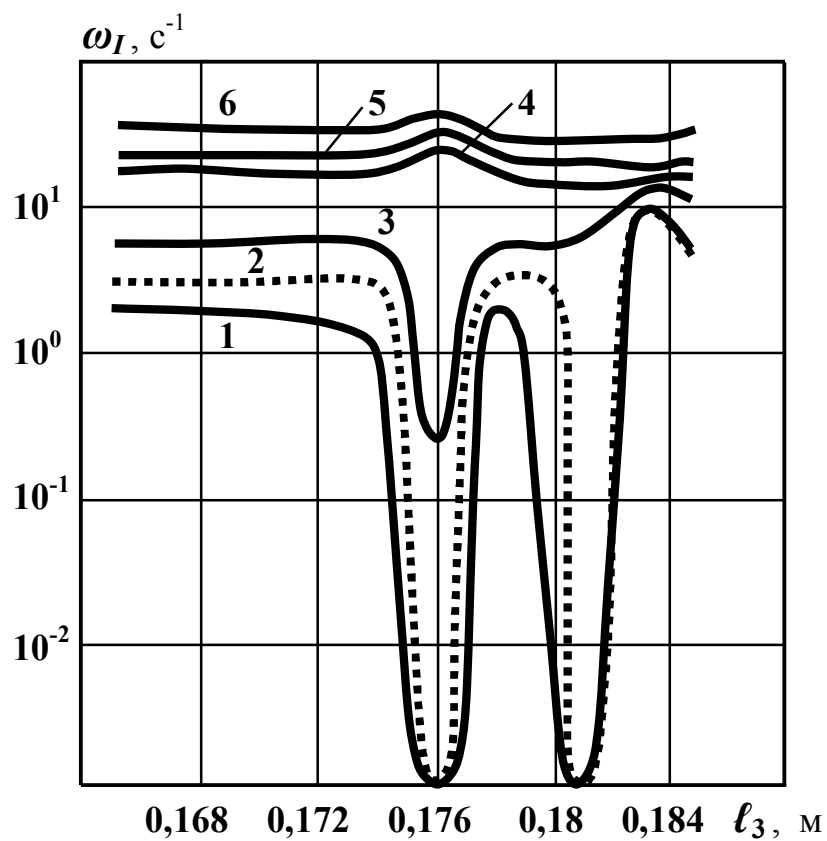


Рис. 5.34. Зависимость коэффициентов демпфирования от длины ℓ_3

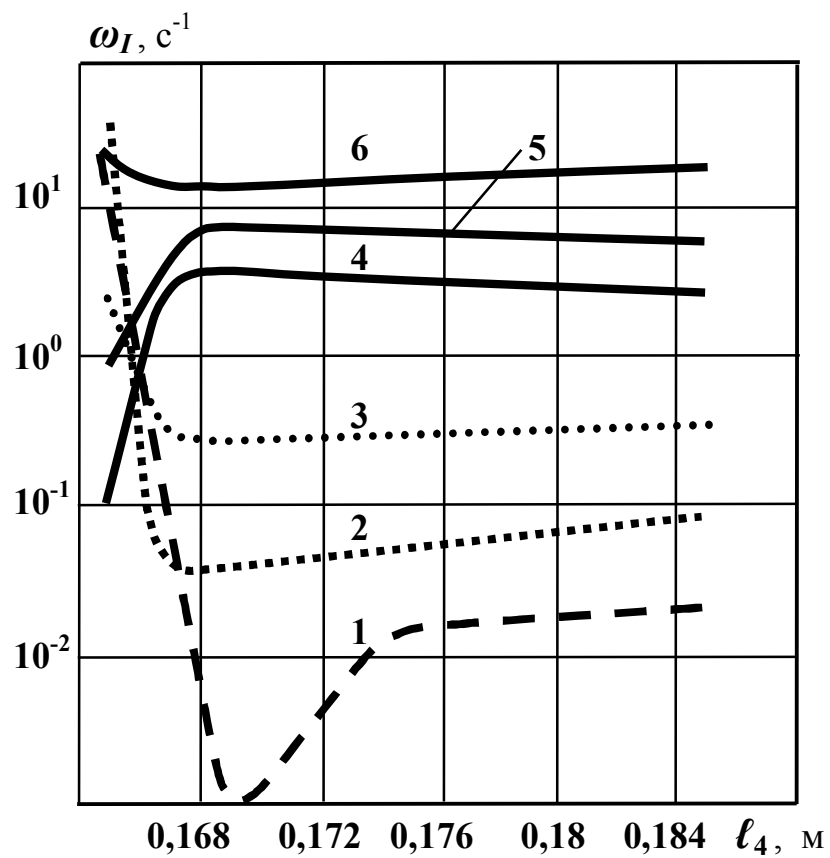


Рис. 5.35. Зависимость коэффициентов демпфирования от длины ℓ_4

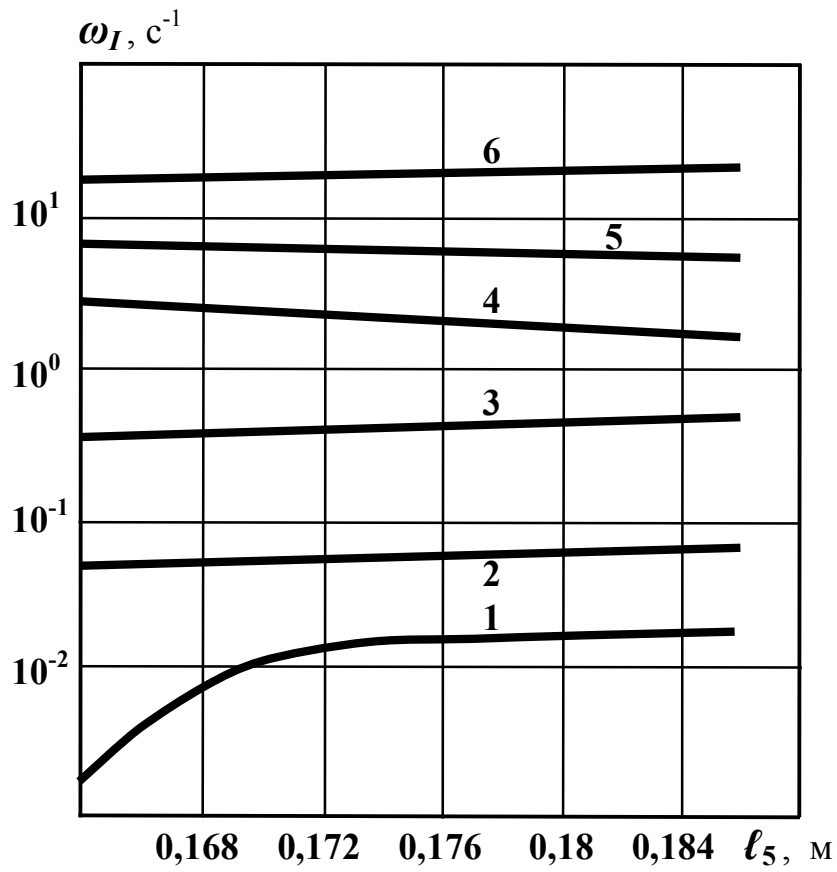


Рис. 5.36. Зависимость коэффициентов демпфирования от длины ℓ_5

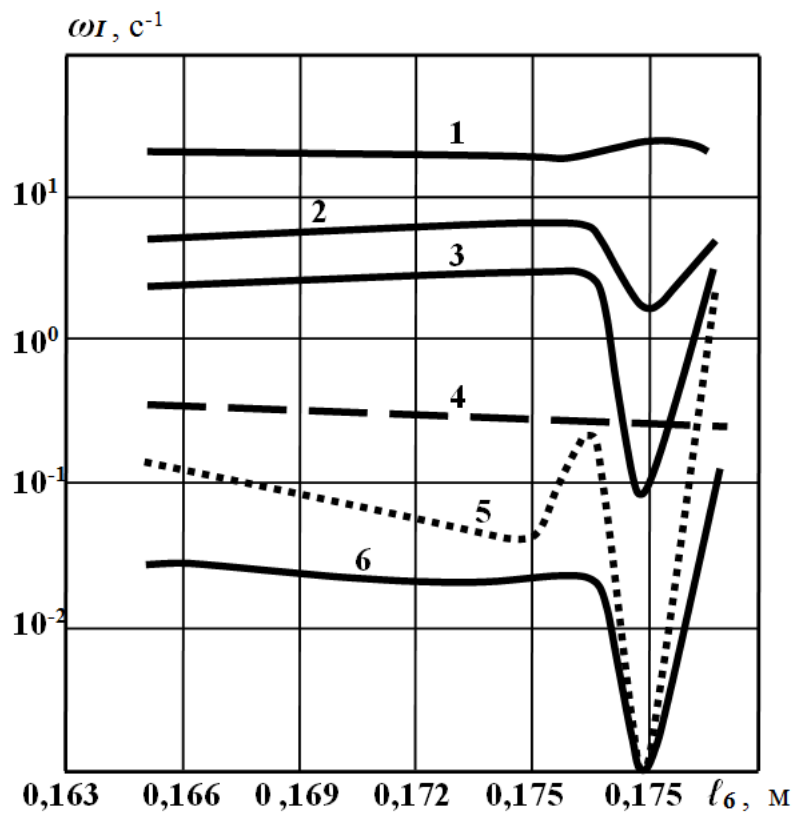


Рис. 5.37. Зависимость коэффициентов демпфирования от длины ℓ_5

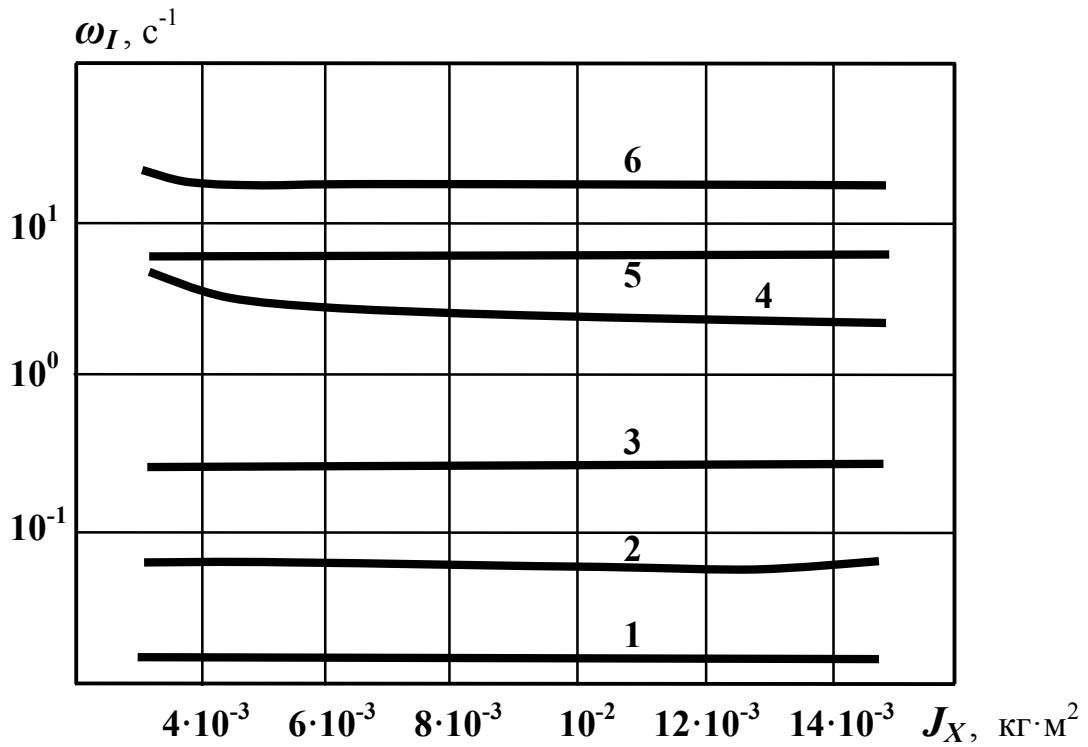


Рис. 5.38. Зависимость коэффициентов демпфирования от момента инерции J_X

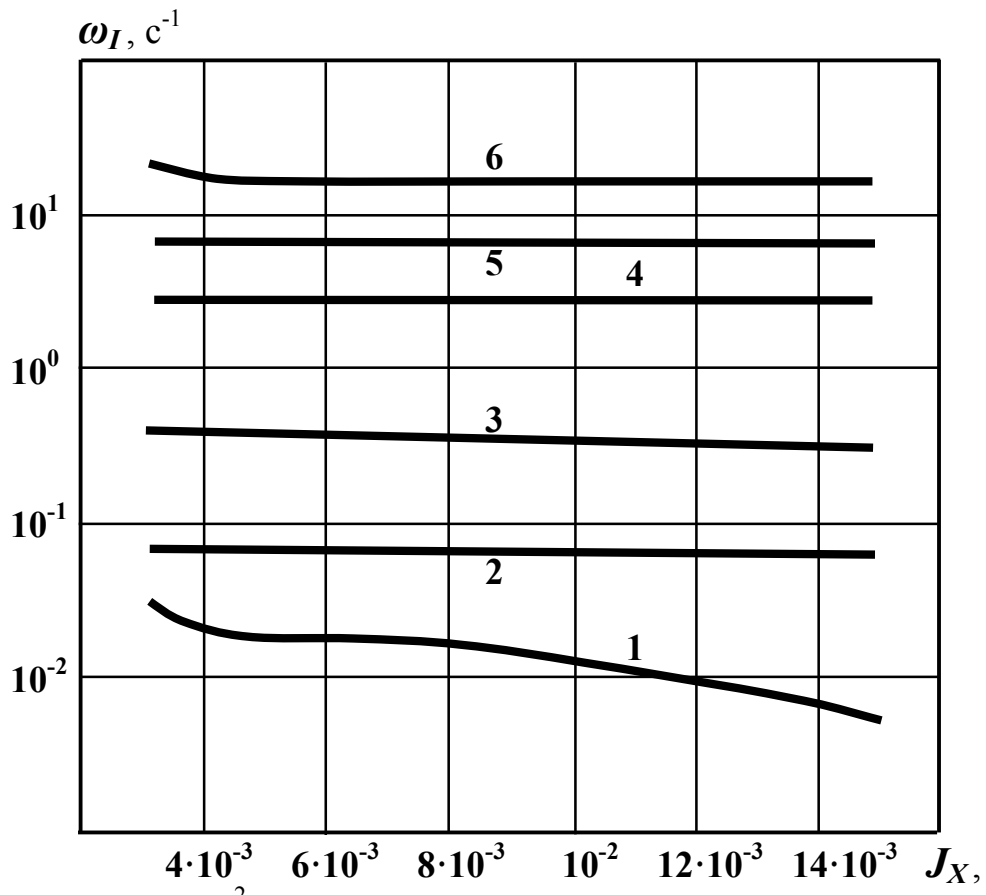


Рис. 5.39. Зависимость коэффициентов демпфирования от момента инерции J_Y

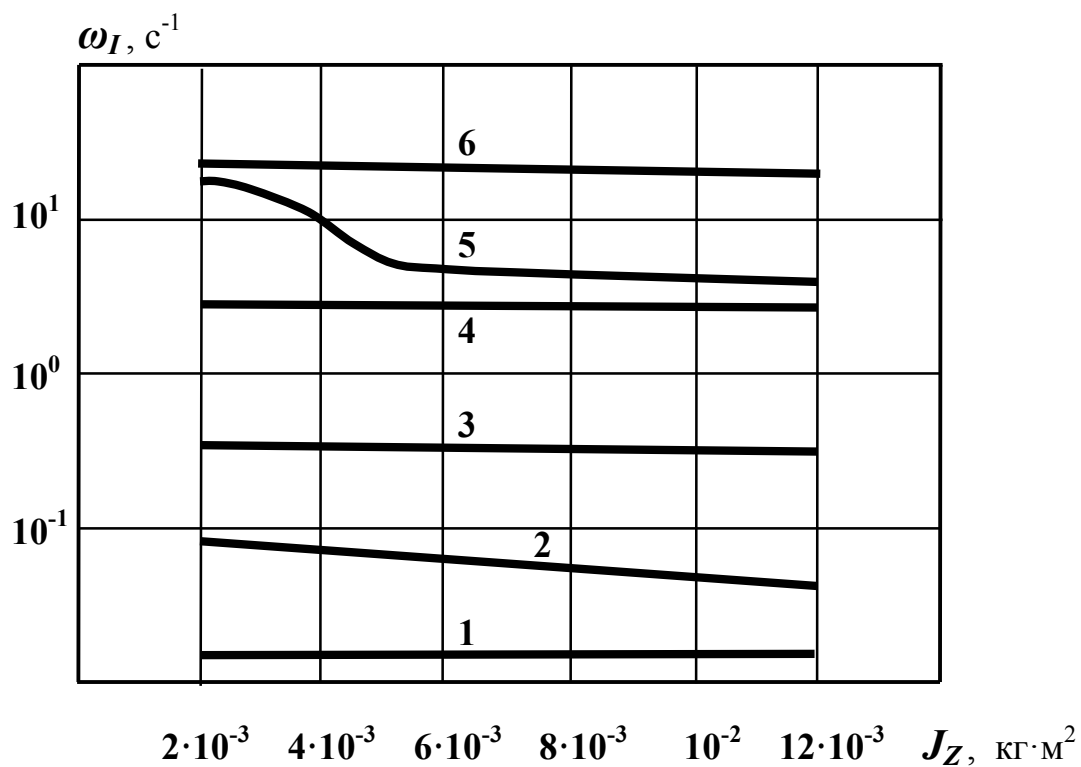


Рис. 5.40. Зависимость коэффициентов демпфирования от момента инерции J_Z

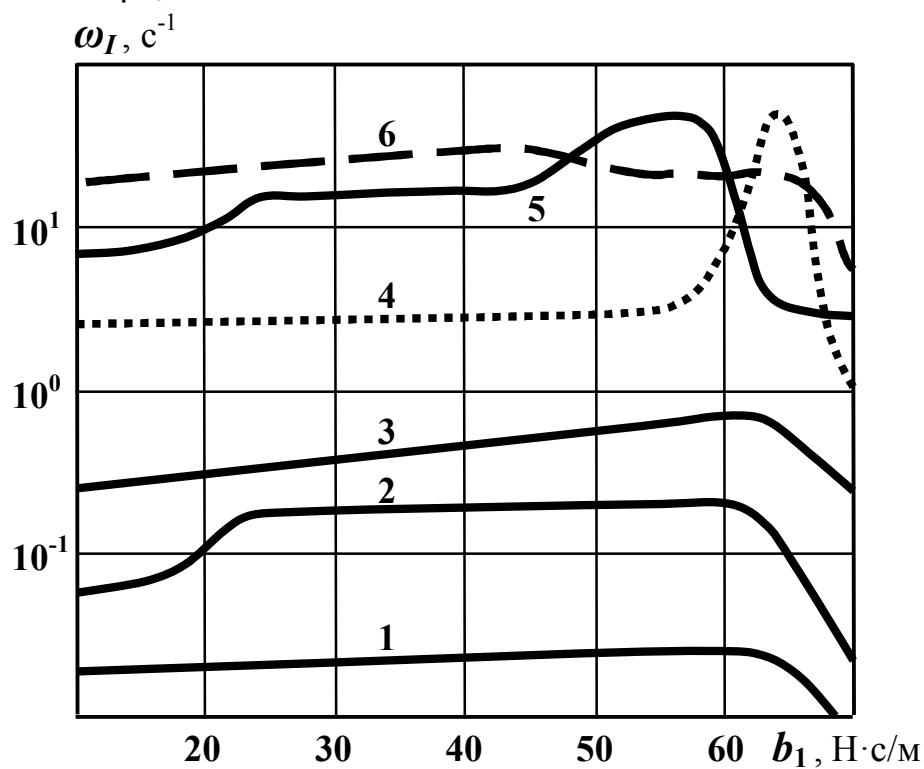


Рис. 5.41. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента сопротивления b_1

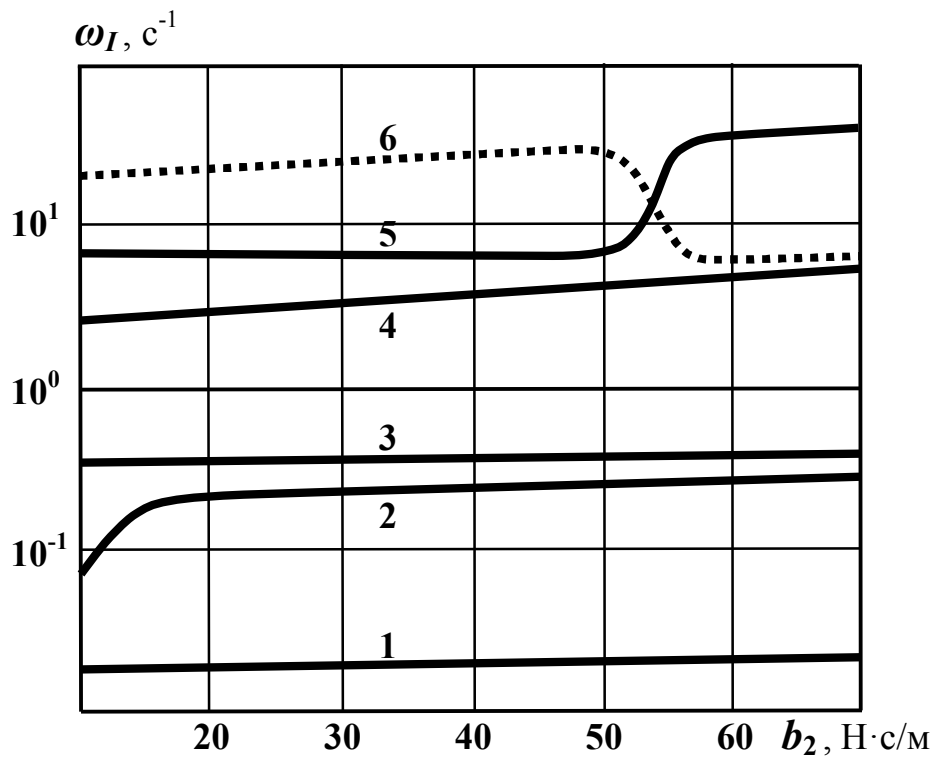


Рис. 5.42. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента сопротивления b_2

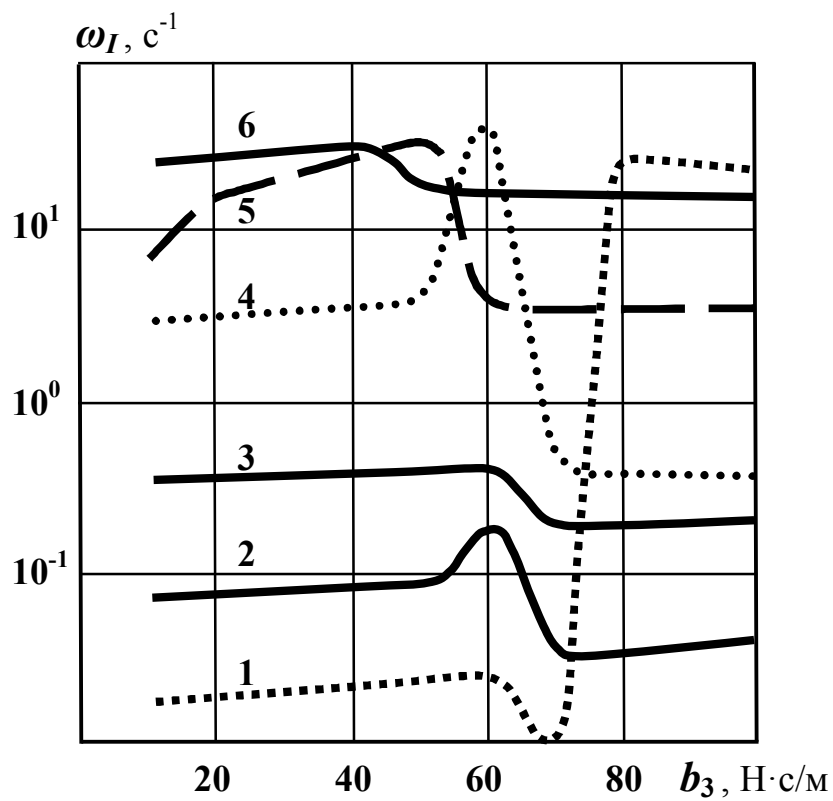


Рис. 5.43. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента сопротивления b_3

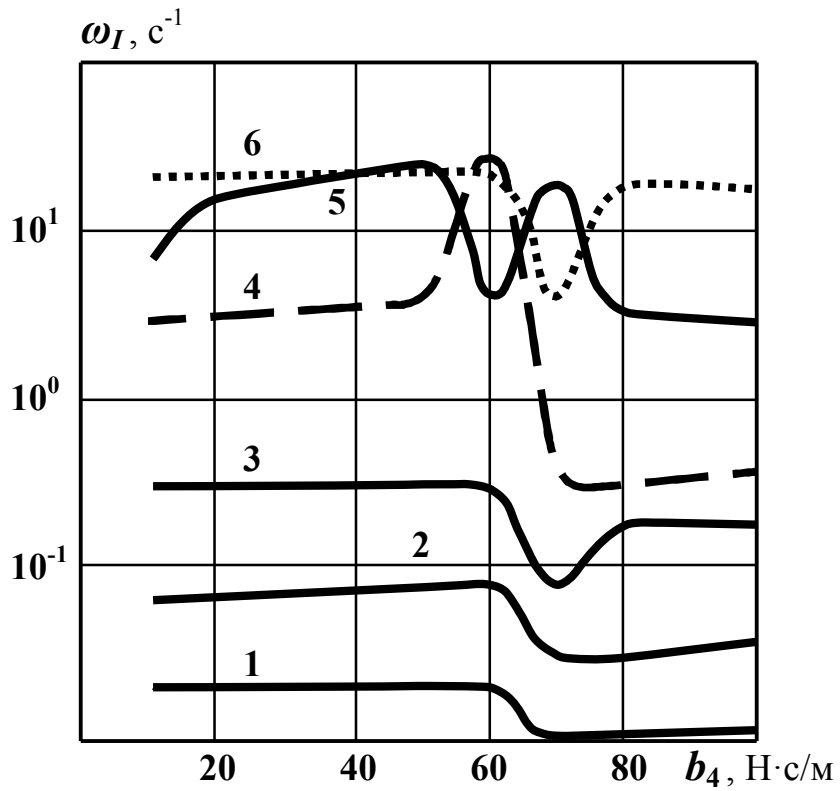


Рис. 5.44. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента сопротивления b_4

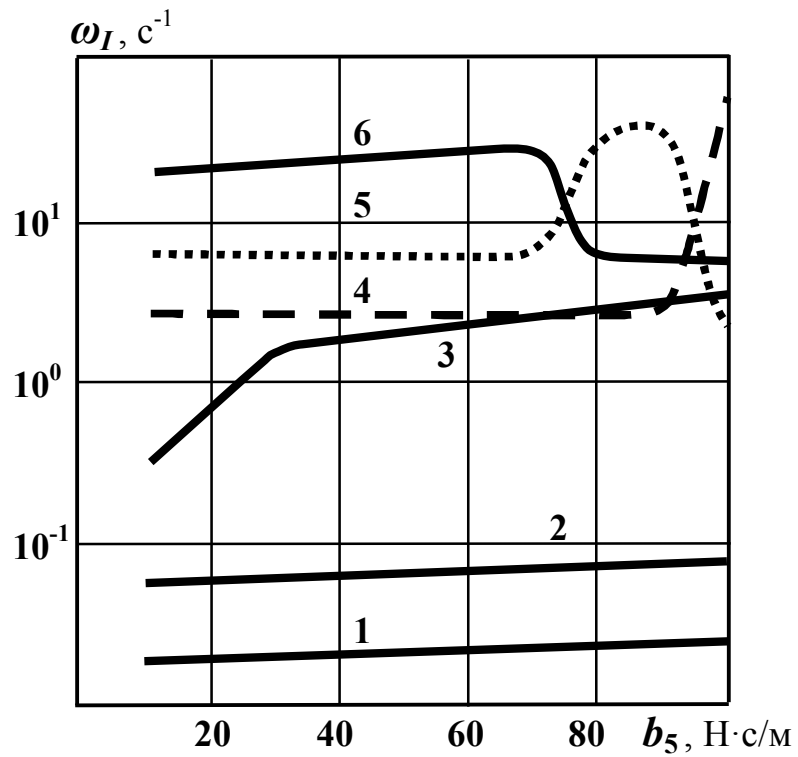


Рис. 5.45. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента сопротивления b_5

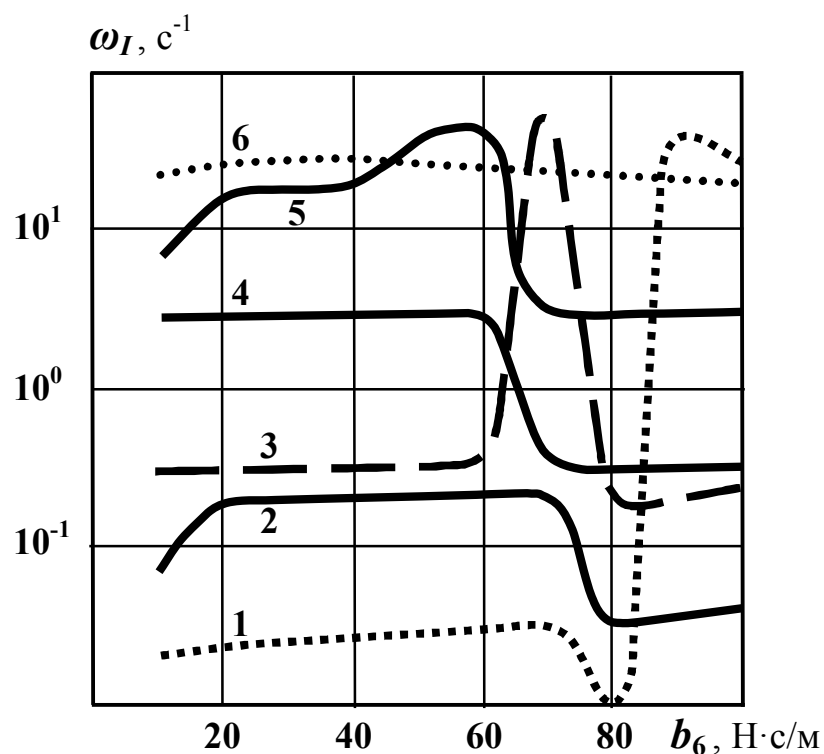


Рис. 5.46. Зависимость коэффициентов демпфирования от коэффициента сопротивления b_6

Целесообразно отметить следующее. Наилучшей эффективностью обладает идеально упругий виброизолятор. Численный метод расчета собственных частот и коэффициентов демпфирования пространственного ℓ -координатного исполнительного устройства позволяет определять максимальные значения амплитуд колебания, при известных скоростях движения по всем шести ℓ -координатам, применительно к любой системе, в зависимости от геометрических и физических параметров. Полученные результаты позволяют прогнозировать параметры ℓ -координатных виброзащитных систем уже на стадиях предварительной разработки, при этом расчет собственных частот колебаний и коэффициентов демпфирования может осуществляться исходя из параметров внешних воздействий. Разработаны программы расчёта основных параметров к любой ℓ -координатной системе.

ГЛАВА 6. ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ

6.1. Обобщенный критерий оценки качества изготовления монокристаллического кремния

Обобщенный критерий оценки качества изготовления монокристаллического кремния определяется из следующих положений [259].

При оценке уровня качества продукции обычно используют метод аналогов. При этом формируют цель такой оценки и выбирают соответствующую номенклатуру показателей качества. Затем выбирают аналог продукции – «базовый образец», имеющий одноименные показатели качества, и назначают метод сравнения значений показателей. Далее находят значения показателей качества рассматриваемой продукции и сравнивают их со значениями показателей качества аналога (базовыми значениями). По результатам сравнения принимают решение о достигнутом уровне качества продукции.

Обобщенный критерий качества продукции определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i}{k_i}}, \quad (6.1)$$

где k_i – значения частных критериев качества изготовления слитка;

a_i – весовой коэффициент i -го частного (локального критерия).

Назначается экспертами из условия:

$$\sum_{i=1}^n a_i = 1. \quad (6.2)$$

При определении качества изготовления слитка были приняты во внимание следующие частные критерии:

k_1 – критерий качества по регулированию теплового режима формирования слитка.

$$k_i = \frac{t_{\max}}{t}, \quad t \in \left(\frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}; \infty \right); \quad (6.3)$$

$$k_i = \frac{t}{t_{\min}}, \quad t \in \left(0; \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2} \right),$$

где t_{\max} – максимальные допустимые значения температур теплового режима;

t_{\min} – минимальные допустимые значения температур теплового режима;

t – реальная температура в определенный момент времени.

k_2 – критерий качества слитка по дислокациям:

$$k_2 = \frac{d_p}{d}, \quad (6.4)$$

где d_p – допустимая плотность дислокаций в слитке;

d – реальная плотность.

k_3 – критерий качества вакуумного откатного поста:

$$k_3 = \frac{Q_p}{Q}, \quad (6.5)$$

где Q_p – допускаемое значение потока монооксида кремния в вакуумной камере;

Q – реальное значение.

k_4 – критерий качества, связанный с погрешностью модулей перемещения;

$$k_4 = \frac{\Delta_p}{\Delta}, \quad (6.6)$$

где Δ_p – допускаемая погрешность модуля перемещения;

Δ – реальная погрешность модуля перемещения.

k_5 – критерий качества, связанный с уровнем привносимой дефектности от модулей перемещения в вакуумный технологический объем:

$$k_5 = \frac{U_p}{U}, \quad (6.7)$$

где U_p – допускаемый уровень привносимой дефектности;

U – реальный уровень привносимой дефектности.

k_6 – критерий качества по стоимости изготовления:

$$k_6 = \frac{c_p}{c}, \quad (6.8)$$

где c_p – допускаемая стоимость изготовления слитка;

c – реальная стоимость.

k_7 – критерий качества по сроку окупаемости:

$$k_7 = \frac{o_p}{o}, \quad (6.9)$$

где o_p – допускаемый срок окупаемости изготовления слитка;

o – реальная окупаемость.

Интегральный критерий качества может быть определен как

$$k = \frac{1}{\frac{a_1}{k_1} + \frac{a_2}{k_2} + \frac{a_3}{k_3} + \frac{a_4}{k_4} + \frac{a_5}{k_5} + \frac{a_6}{k_6} + \frac{a_7}{k_7}}, \quad (6.10)$$

где $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7$ – весовые коэффициенты, а в общем виде:

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 \frac{a_i}{k_i}}. \quad (6.11)$$

Обобщенный критерий оценки качества изготовления монокристаллического кремния позволяет оценить качество выпускаемой продукции (слитков кремния) по сравнению с базовым образцом.

6.2. Автоматизированные установки для выращивания монокристаллического кремния по методу Чохральского

Современные установки для выращивания монокристаллического кремния по методу Чохральского позволяют получать слитки длиной до нескольких метров и диаметром от 200 мм (установки уровня 15-летней давности) до 450 мм (самые современные). На рис. 6.1. показан один из таких слитков, полученный в японском Институте монокристаллического кремния (Super Silicon Crystal Research Institute Corporation) [260]. В настоящее время мировая полупроводниковая промышленность производит переход с кремниевых пластин диаметром 300 мм на пластины диаметром 450 мм [262], поскольку при увеличении пластины стоимость каждого чипа падает. Расчёты показывают, что переход с 300 мм на 450 мм в конечном итоге даст экономию около 30% [263]. Сравнительные размеры монокристаллических кремниевых пластин приведены на рис. 6.2. .

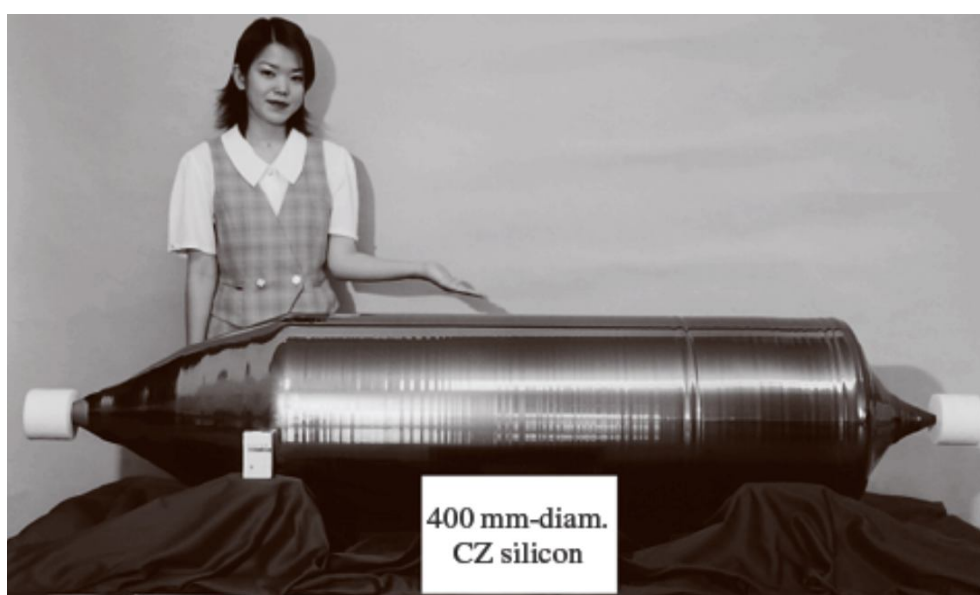


Рис. 6.1. Слиток монокристаллического кремния диаметром 400 мм, полученный методом Чохральского [260]



Рис. 6.2. Сравнительные размеры монокристаллических кремниевых пластин диаметров 450 мм и 300 мм [261]

Далее будут описаны некоторые отечественные и зарубежные установки, предназначенные для промышленного выращивания высококачественных монокристаллических слитков кремния.

Высокопроизводительная автоматизированная установка «Кедр» для выращивания монокристаллического кремния

Для получения особо чистого монокристаллического кремния специалистами ФГУП «Красмаш» совместно с ФГУП «Институт термохимии» и Красноярским научным центром СО РАН, опираясь на опыт специалистов ФГУП «ГХК» и ОАО «Гиредмет» [264], была разработана автоматизированная ростовая установка «Кедр» [265], внешний вид которой представлен на рис. 6.3.

Управление установкой полностью автоматическое, начиная с вакуумирования камеры и заканчивая охлаждением кристалла, разработчиками были подобраны режимы и создана программа автоматического управления процессом.

Основные особенности установки «Кедр»:

- установка позволяет работать с тепловыми узлами под тигли 18” (457 мм), 20” (508 мм) и при комплектации плавильной камерой увеличенного диаметра с тепловым узлом под тигель 22” (558 мм);
- система управления имеет современный и полностью русифицированный интерфейс и обеспечивает выращивание монокристаллов в автоматическом режиме, начиная с этапа вакуумирования;
- малогабаритный источник силового питания имеет модульное исполнение и позволяет переходить на тепловые узлы большей мощности и устанавливать донные нагреватели;
- тепловые узлы могут изготавливаться из композитных материалов на основе углерода и графита.

По отдельному заказу установка может компоноваться: устройством для съема и транспортировки кристалла, устройством загрузки тигля, устройством догрузки, площадкой обслуживания.

Основные параметры указаны в табл. 6.1.

Исходный материал для загрузки тигля – дробленый поликристаллический кремний.

Система управления процессом выращивания монокристалла – автоматическая.

Показатели надежности:

Время непрерывной работы установки при доверительной вероятности безотказной работы $\geq 0,98$ – не менее 100 часов.

Длительность рабочего цикла выращивания монокристалла:

— в тигле $\varnothing 457 \approx 37$ часов,

— в тигле $\varnothing 508 \approx 56$ часов.

Коэффициент технического использования (K_{mu}) – 0,85.

Средний срок службы установки до капитального ремонта при коэффициенте использования $K_u = 0,8$ – 5 лет.

Основные характеристики установки представлены в табл. 6.2.

Установка оснащена:

- звуковой и визуальной сигнализацией с переходом в режим «ОТМЕНА» в случае повышения абсолютного давления в полости печного агрегата выше 45 мм рт. ст. при включенном источнике питания;
- предохранительным клапаном, обеспечивающим сброс избыточного давления из полости печного агрегата при повышении давления 7÷10 КПа);
- конечными выключателями, ограничивающими перемещение исполнительных органов сверх необходимого диапазона и отключающими соответствующие приводы;
- современной системой управления с информационно-измерительным модулем и базовой программой автоматического управления ростом кристалла диаметром до 250 мм.

В установке предусмотрены механические и электрические блокировки, исключающие включение агрегатов или перемещение исполнительных органов при их неисправностях или неправильных действиях оператора, если эти включения (перемещения) могут привести к аварийной ситуации.

Типичные графики основных зависимостей для базовой технологической программы приведены на рис. 6.4÷6.11.

Таблица 6.1

Основные параметры автоматизированной ростовой установки «Кедр»

Наименование	Значение
1. Скорость перемещения тигля, мм/мин: рабочая (плавное регулирование): ускоренная:	0,001÷0,7 10÷190
2. Частота вращения тигля (с реверсом) об/мин	0,2÷30
3. Максимальный ход тигля, мм	440
4. Скорость перемещения заправки, мм/мин: рабочая (плавное регулирование): ускоренная:	0,05÷8,0 10÷760
5. Частота вращения заправкодержателя (с реверсом) об/мин	0,3÷50
6. Максимальная величина перемещения заправки, мм	2874
7. Остаточное давление в камере, мм рт.ст.: рабочее: предварительное:	5÷20 5÷10 ⁻³

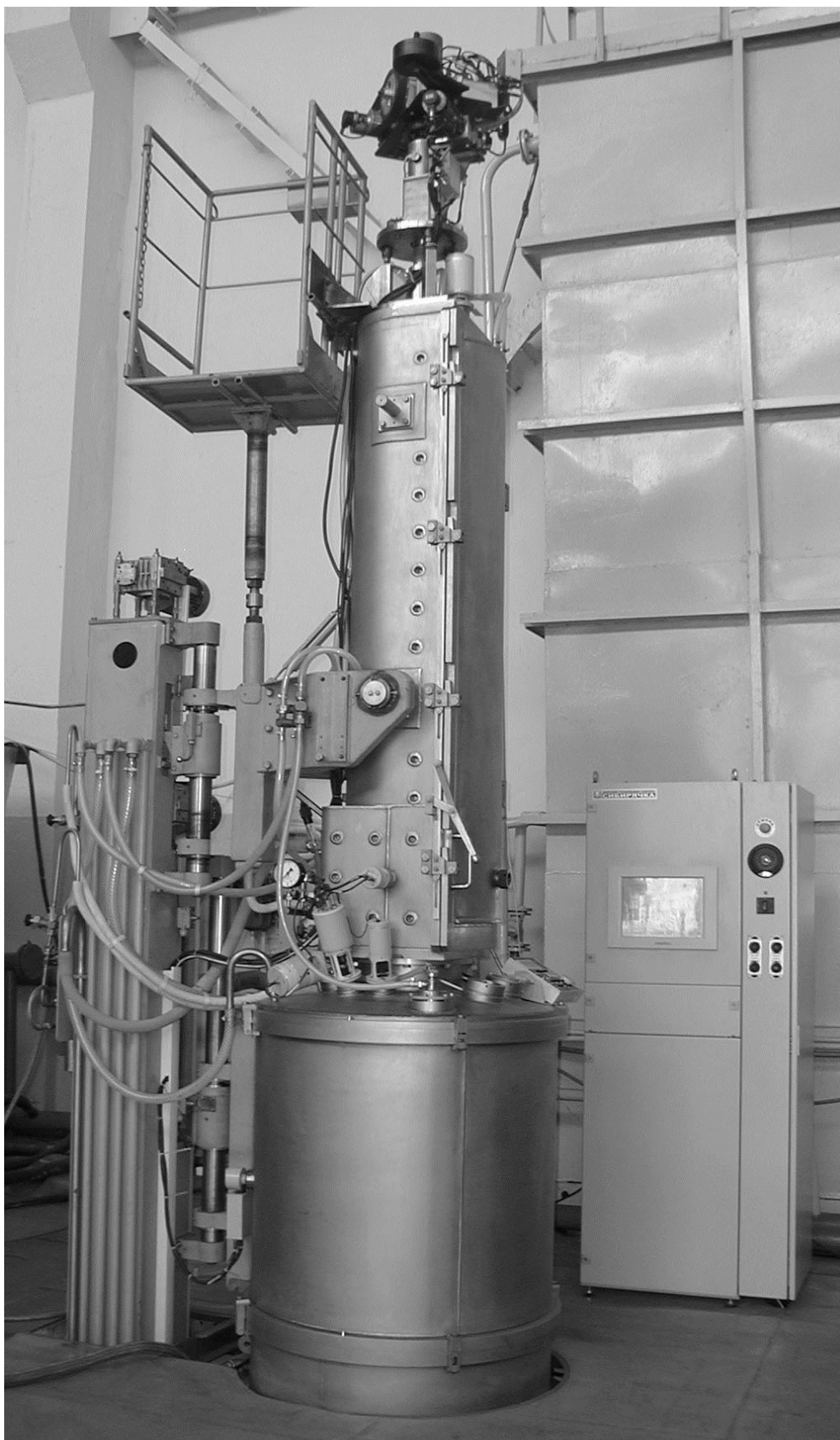


Рис. 6.3. Ростовая установка «Кедр»

Таблица 6.2

Основные характеристики автоматизированной ростовой установки «Кедр»

Наименование	Значение
1. Размеры выращиваемого кристалла, мм: диаметр: длина:	150÷230 до 2000
2. Максимальная масса загрузки тигля, кг: Тигель Ø 457 мм: Тигель Ø 508 мм:	60 90
3. Температура нагревателя, С°: номинальная: максимальная:	1550 1700
4. Расход инертного газа, л/ч	500÷5000
5. Расход охлаждающей воды, м ³ /ч, не более	10
6. Давление воды в системе охлаждения, МПа	0,2÷0,4
7. Температура охлаждающей воды, С°: на входе: на выходе:	≤ 25 ≤ 40
8. Трехфазная сеть переменного тока с напряжением, В	380
9. Максимальная выходная мощность источника электропитания нагревателя, кВт	150
10. Мощность, потребляемая цифровым управляющим комплексом модернизированным, кВт	≤ 18
11. Габаритные размеры установки, мм: длина не более ширина, не более высота, не более	2700 2650 6340
12. Масса, кг, не более: печного агрегата установки	3700 5500

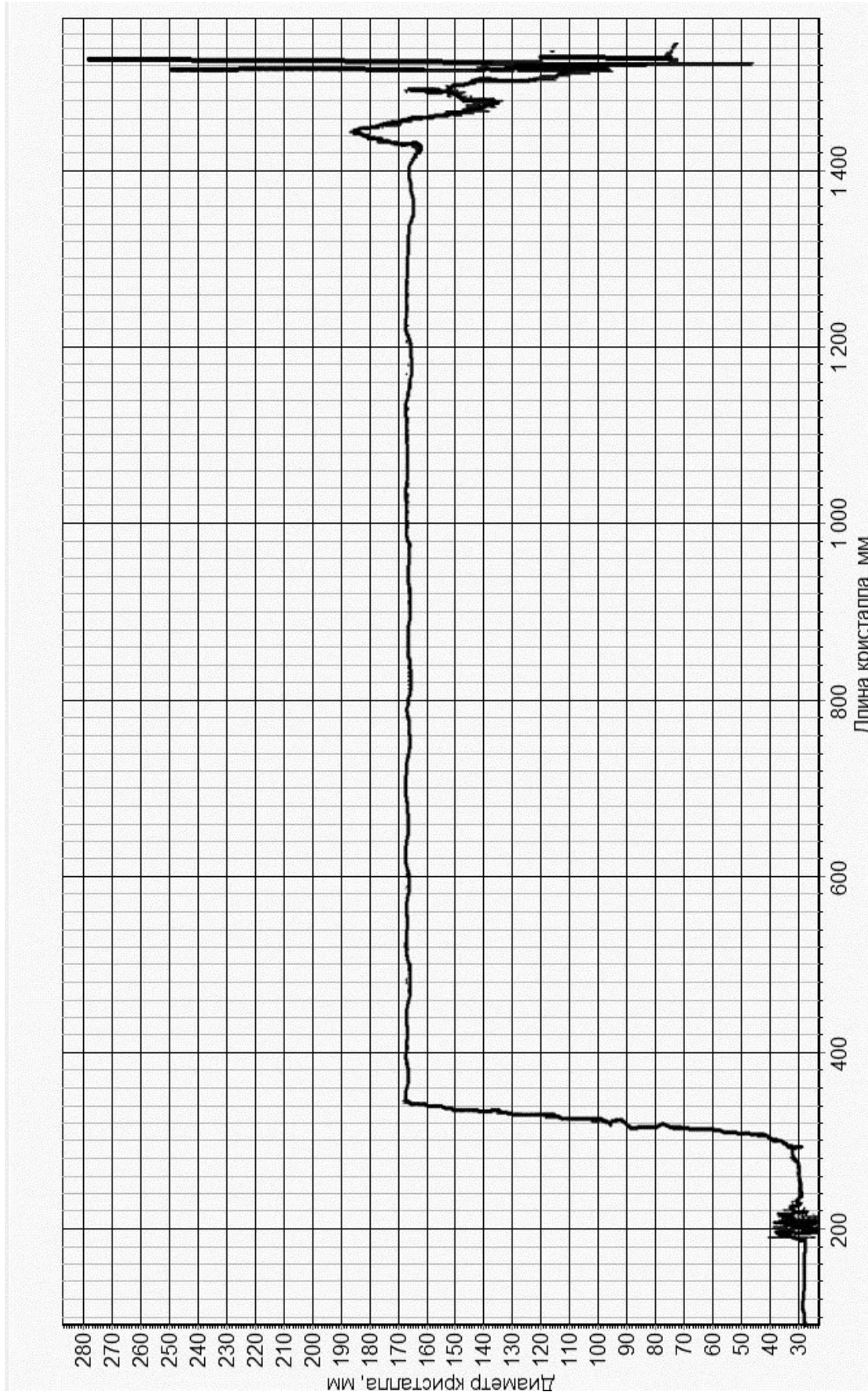


Рис. 6.4. График контроля диаметра кристалла

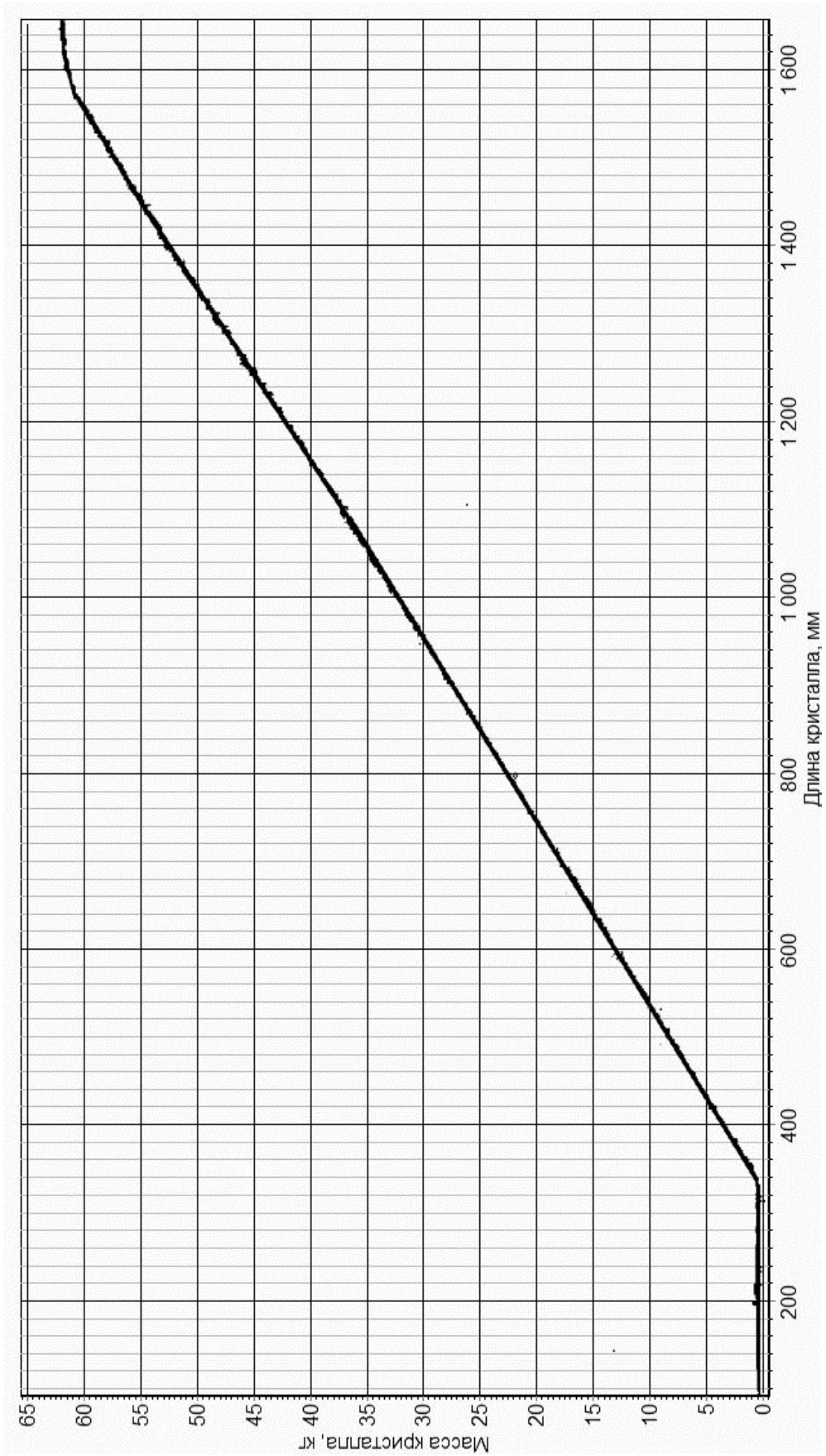


Рис. 6.5. График контроля массы кристалла

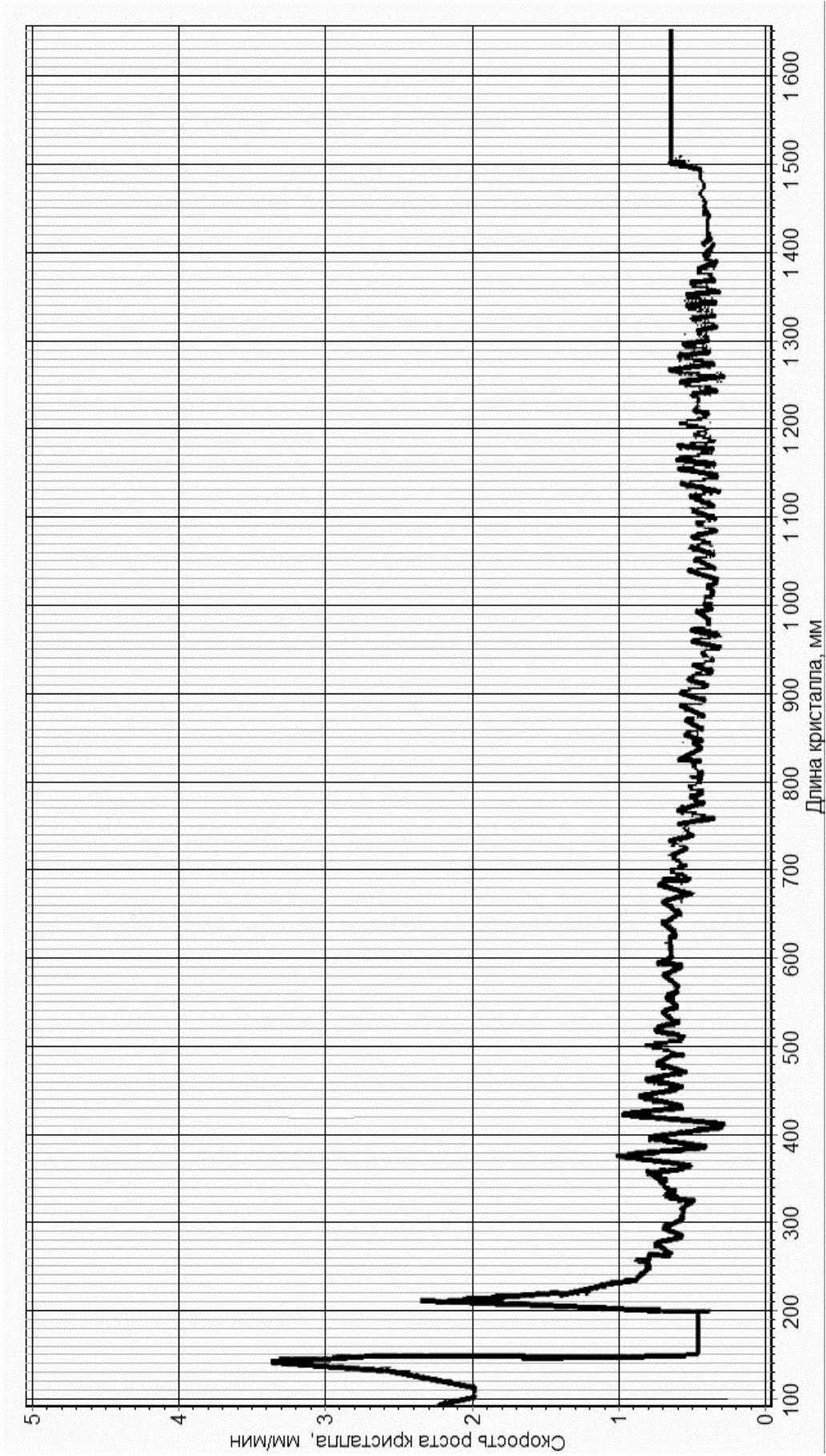


Рис. 6.6. График контроля скорости роста кристалла

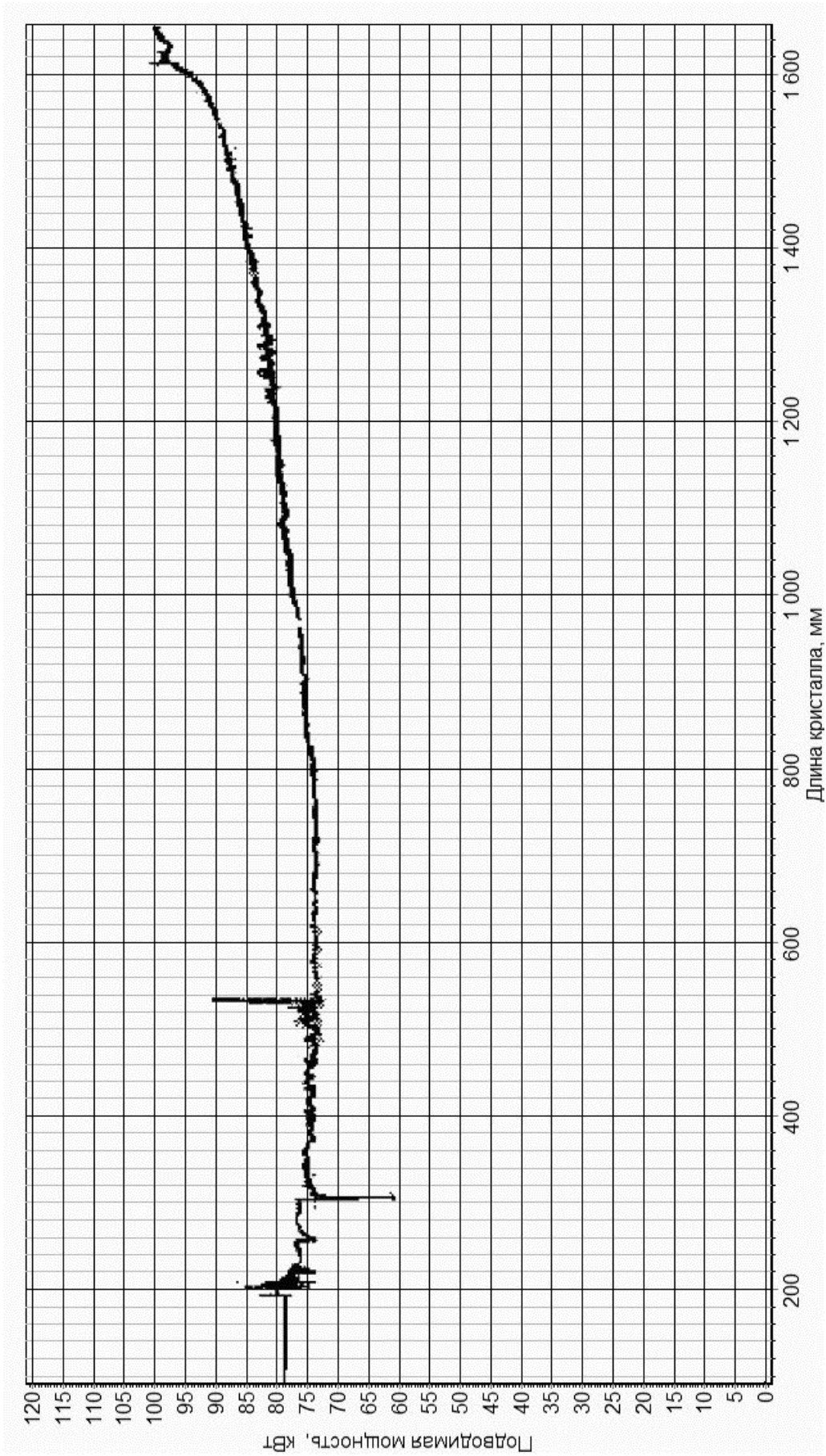


Рис. 6.7. График контроля мощности, подводимой на нагреватель

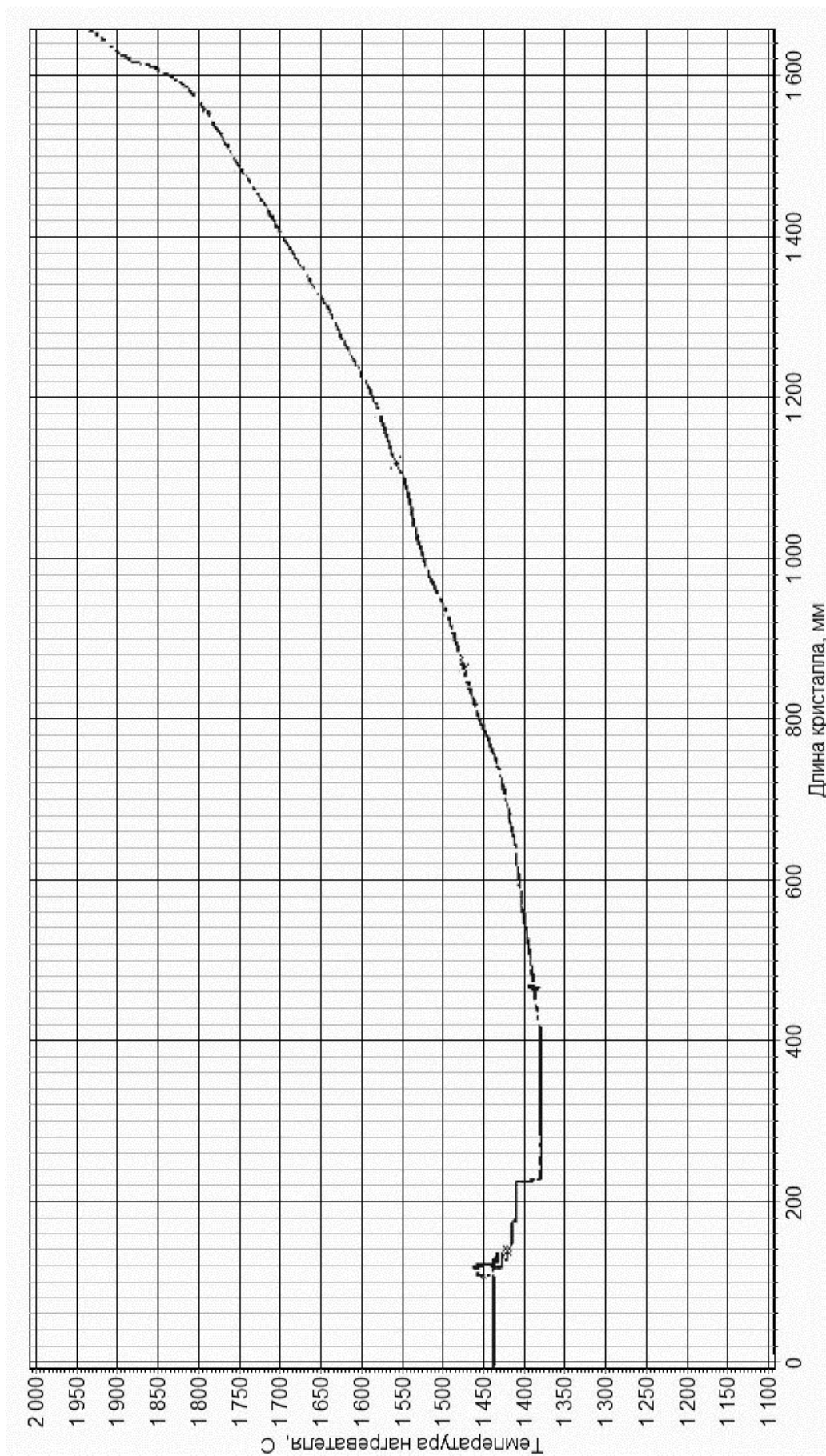


Рис. 6.8. График контроля температуры нагревателя

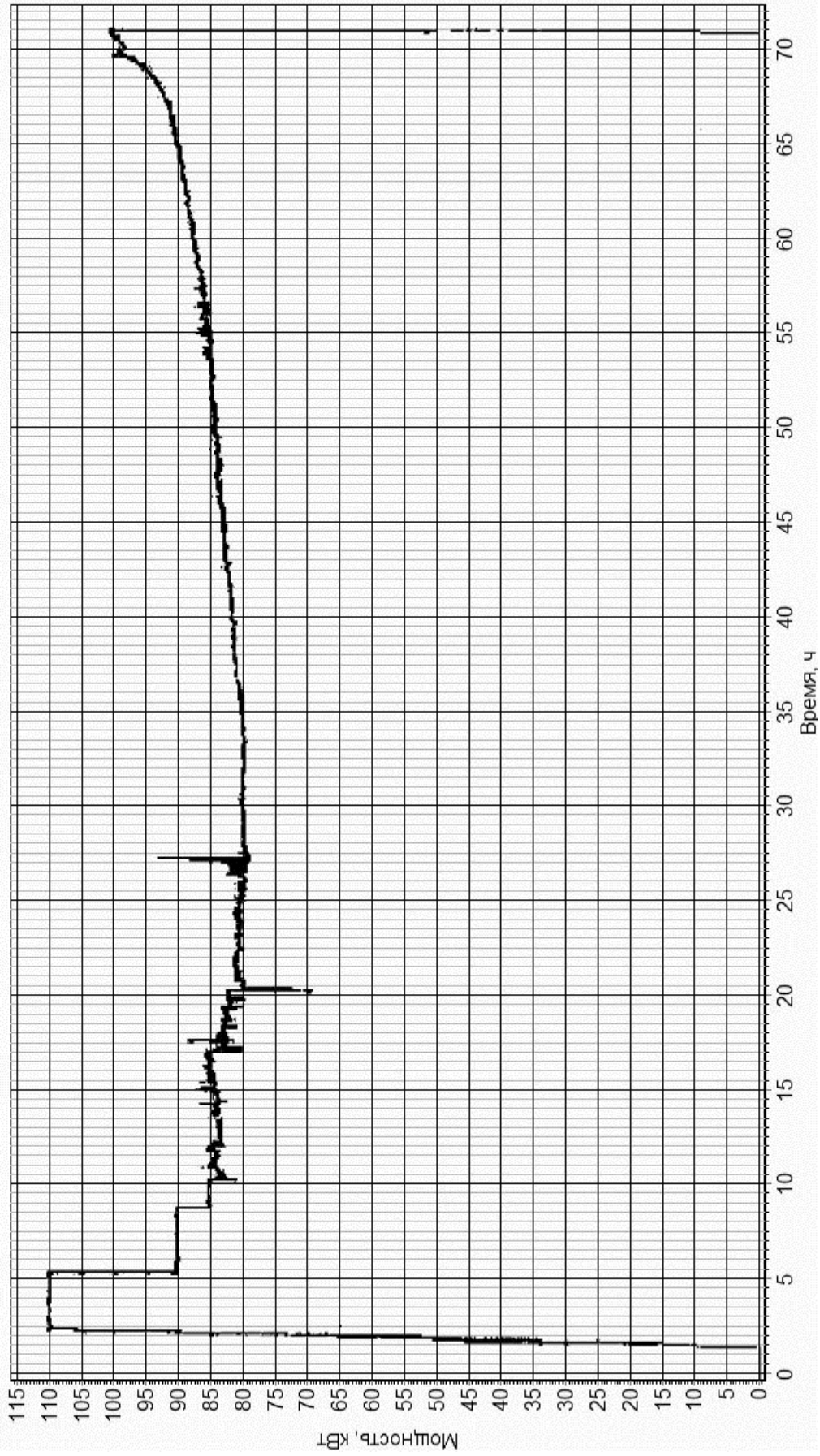


Рис. 6.9. График контроля мощности, подводимой на нагреватель в процессе плавления и роста кристалла

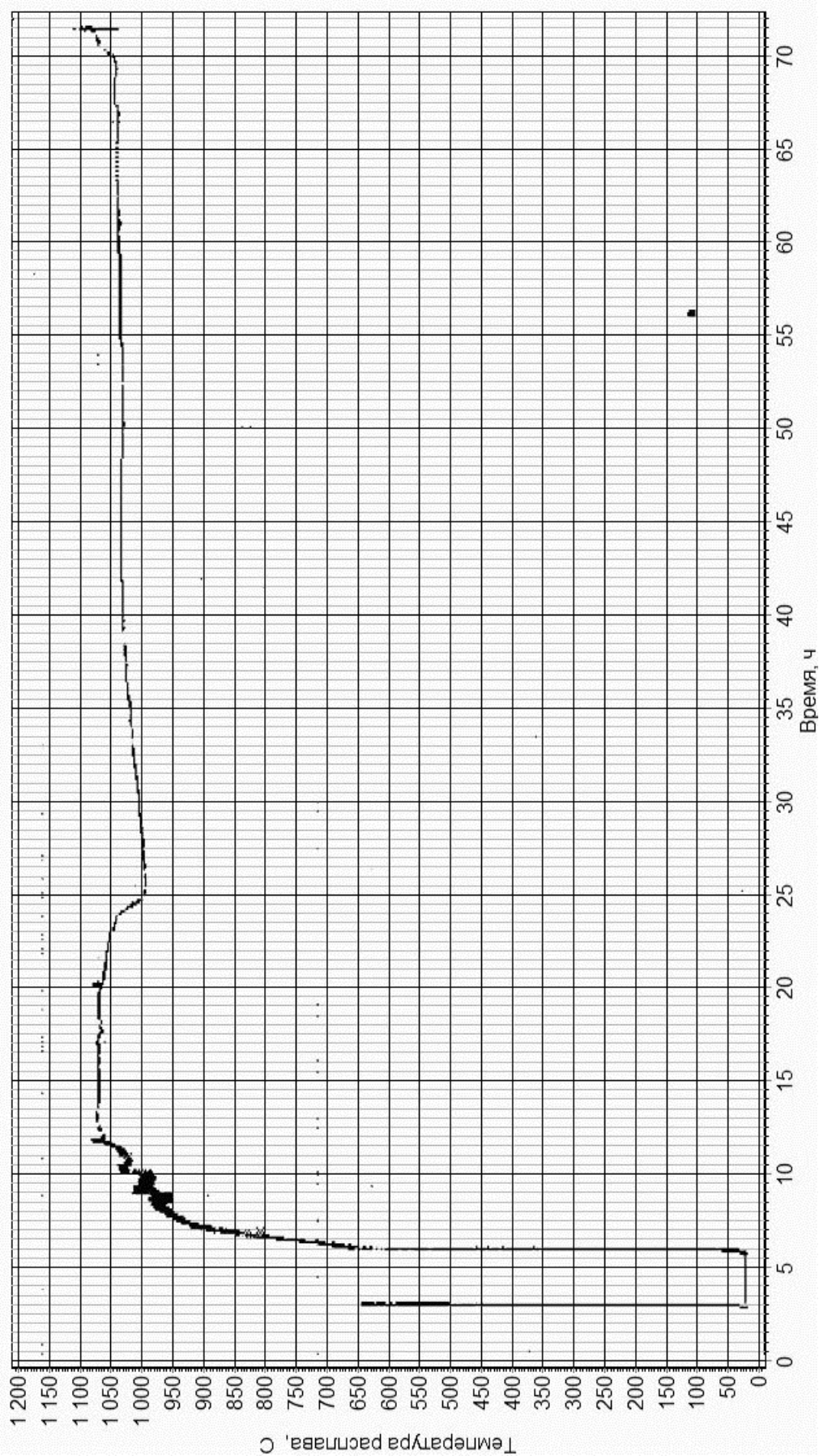


Рис. 6.10 График контроля температуры расплава

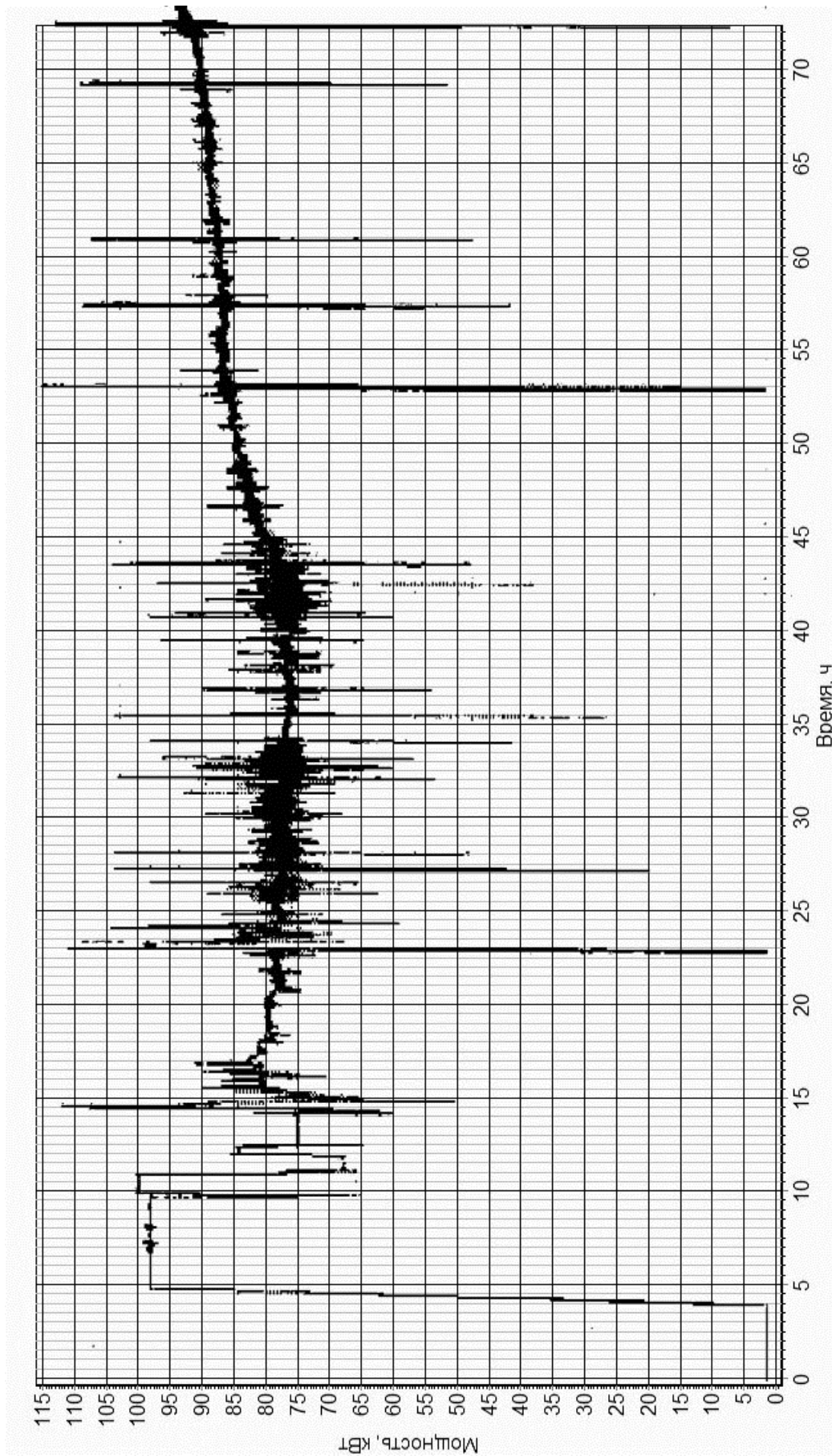


Рис. 6.11. График контроля мощности подводимой на нагреватель при электропитании от источника, применяемого на прежних моделях установок

Агрегаты ростовой установки «Кедр» позволяют с минимальными изменениями перейти на изготовление установок для выращивания монокристаллов диаметром 300 мм и более.

Установка «Редмет-90М» разработки ОАО «Гиредмет»

ОАО «Гиредмет» (г.Москва) является ведущей отечественной научно-исследовательской и проектной организацией материаловедческого профиля, специализирующиеся на разработке новых материалов на основе редких металлов, их соединений и сплавов, высокочистых веществ, полупроводниковых материалов, наноматериалов и нанотехнологий [264].

Одним из направлений деятельности института является разработка установок для производства монокристаллического полупроводникового кремния, в том числе установок, реализующих метод Чохральского. Установка «Редмет-90М» (рис. 6.12÷6.13) является одной из последних разработок института [266] (развитие серии установок «Редмет») и базируется на конструктивных решениях, прошедших многолетнюю отработку в серийном производстве. Ее отличают надежность работы, удобство обслуживания, простота изготовления и эксплуатации. Установка позволяет производить монокристаллы кремния массой до 100 кг, диаметром до 210 мм. В установку заложена возможность модернизации для получения монокристаллов диаметром 300 мм.

Основные характеристики установки приведены в табл. 6.3.



Рис. 6.12. Установка «Редмет-90М», общий вид

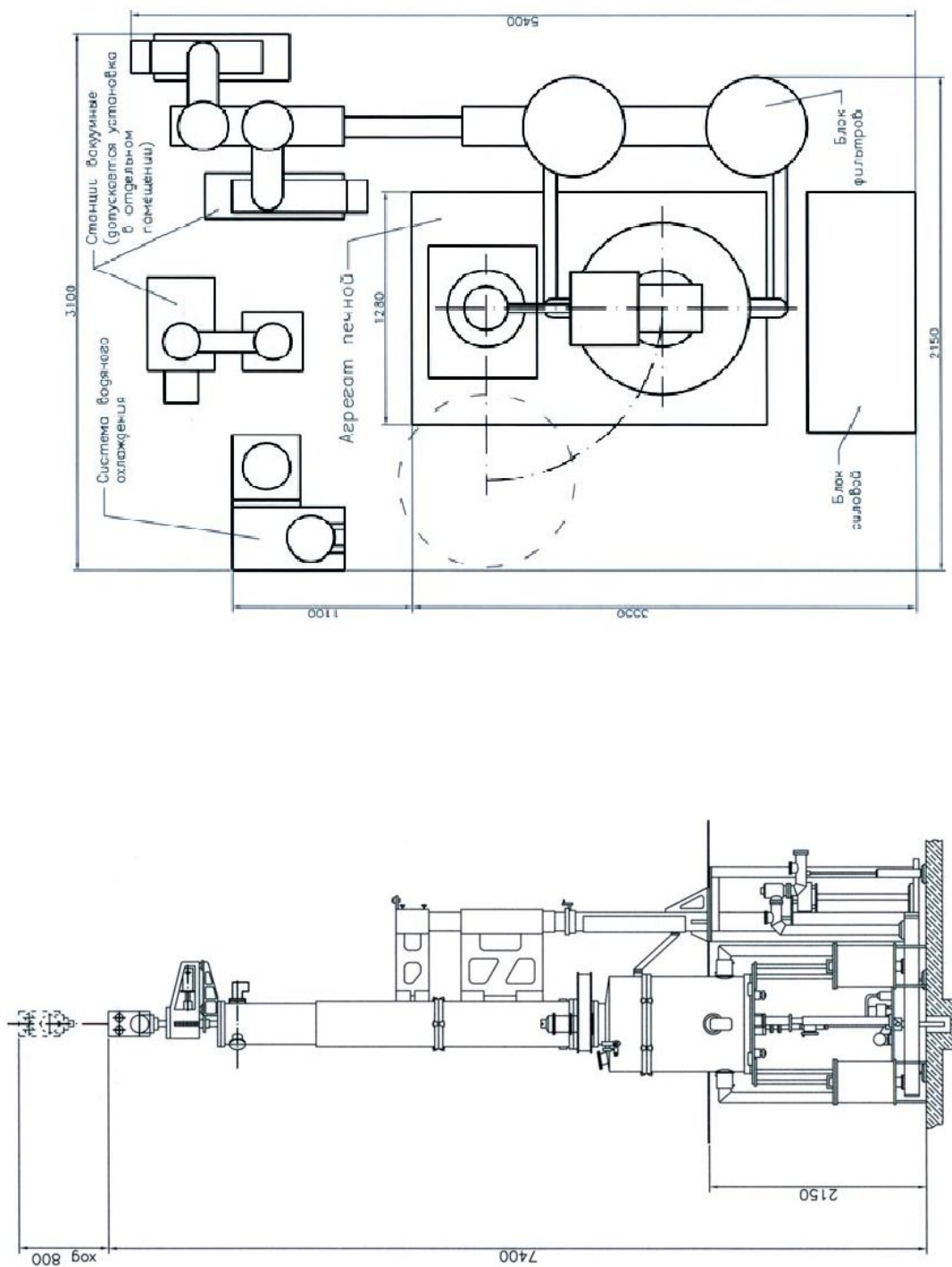


Рис. 6.13. Установка «Редмет-90М», габаритный чертеж

Таблица 6.3

Основные характеристики ростовой установки «Редмет-90М»

Наименование	Значение
Величина загрузки тигля	до 210 кг
Максимальный диаметр монокристалла	300 мм
Осевое перемещение затравки	до 3000 мм
Диаметр тигля	508 мм, 610 мм
Установленная мощность	250 кВт
Скорость перемещения затравки рабочая маршевая	(0,25÷7,6) мм/мин (14÷720) мм/мин
Частота вращения тигля	(1÷28) об/мин
Величина хода штока тигля	450 мм
Вакуум предельный	$5 \cdot 10^{-2}$ торр
Давление инертного газа на входе в камере	2,0 ати (5÷20) торр

Таблица 6.3 (продолжение)
Основные характеристики ростовой установки «Редмет-90М»

Наименование	Значение
Расход инертного газа	(1000÷4000) л/ч
Давление воды на входе на выходе	(2÷4) ати свободный слив
Расход воды	до 10 м ³ /ч
Электропитание установки	трехфазное, 380/220В, 50Гц
Система управления	компьютеризированная
Габариты печного агрегата ширина глубина высота высота при поднятой ка- мере	1900 мм 2350 мм 7400 мм 8200 мм
Масса печного агрегата	4500 кг

Установка «Изотерм-20» разработки ОАО «НИИ «Изотерм»

ОАО «НИИ «Изотерм» (г.Брянск) [267] разрабатывает и производит широкий спектр продукции для науки и промышленности, в частности, ростовое оборудование для производства монокристаллов кремния. Установка «Изотерм-20» (рис. 6.14) предназначена для производства в автоматическом режиме (кроме затравления) монокристаллов кремния диаметром до 250 мм общей длиной до 1600 мм методом Чохральского из тигля диаметром 508 мм.

Основные технические характеристики ростовой установки «Изотерм-20» приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4
Основные характеристики ростовой установки «Изотерм-20»

Наименование	Значение
Диаметр кристалла, мм, не более	250
Длина кристалла, мм, не более	1600
Скорость перемещения затравки, мм/мин	0,1÷8,0
Частота вращения затравки, об/мин	1,0÷30,0
Погрешность поддержания скорости перемещения и частоты вращения затравки, %	±1
Рабочий ход тигля, мм	400
Скорость перемещения тигля, мм/мин	0,01÷2,0
Частота вращения тигля, об/мин	1,0÷20,0
Погрешность поддержания скорости перемещения и частоты вращения тигля, %	±1
Диаметр тигля, мм	508
Предельное остаточное давление, мм рт.ст.	5×10^{-3}
Максимальная скорость откачки, л/с	150
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	10
Давление охлаждающей воды на входе, МПа, не менее	0,3

Таблица 6.4 (продолжение)
Основные характеристики ростовой установки «Изотерм-20»

Наименование	Значение
Расход аргона, л/ч, не более	3600
Рекомендуемое давление на входе в газовую систему, МПа	0,25
Рекомендуемое давление сжатого воздуха, МПа	0,6
Расход сжатого воздуха на процесс, м ³ , не более	0,1
Питание: - напряжение, В - частота, Гц	3x380 +N 50
Максимальная мощность на нагревателе, кВА	150
Напряжение питания нагревателя, В	0÷60
Габаритные размеры, мм: - длина - ширина - высота	4000 2700 6200
Масса, кг	6000



Рис. 6.14. Установка «Изотерм-20», общий вид

Оборудование зарубежного производства (на примере установки EKZ-3500 компании PVA TePla AG)

В последнее время в полупроводниковой промышленности происходит все большее количество слияний и поглощений, вследствие чего фирмы становятся крупнее, а их число уменьшается. Выпуск высокопроизводительного промышленного оборудования концентрируется у небольшого числа крупных производителей – как правило, транснациональных корпораций. Помимо всего прочего, это можно объяснить чрезвычайной сложностью и дороговизной современного промышленного оборудования, предназначенного для производства полупроводниковых материалов. Переход на все больший диаметр изготавливаемых кристаллов вызывает резкое усложнение и удорожание и без того сложного и дорогого оборудования. Одним из крупнейших игроков на мировом рынке ростового оборудования для производства монокристаллов кремния методом Чохральского в настоящее время является фирма PVA TePla AG [268]. В качестве примера современной ростовой установки можно рассмотреть установку EKZ-3500 этой компании [269], общий вид и габаритный чертеж которой приведены соответственно на рис. 6.15÷6.16. Основные характеристики установки EKZ-3500 приведены в табл. 6.5.



Рис. 6.15. Установка EKZ-3500 компании PVA TePla AG [269], общий вид

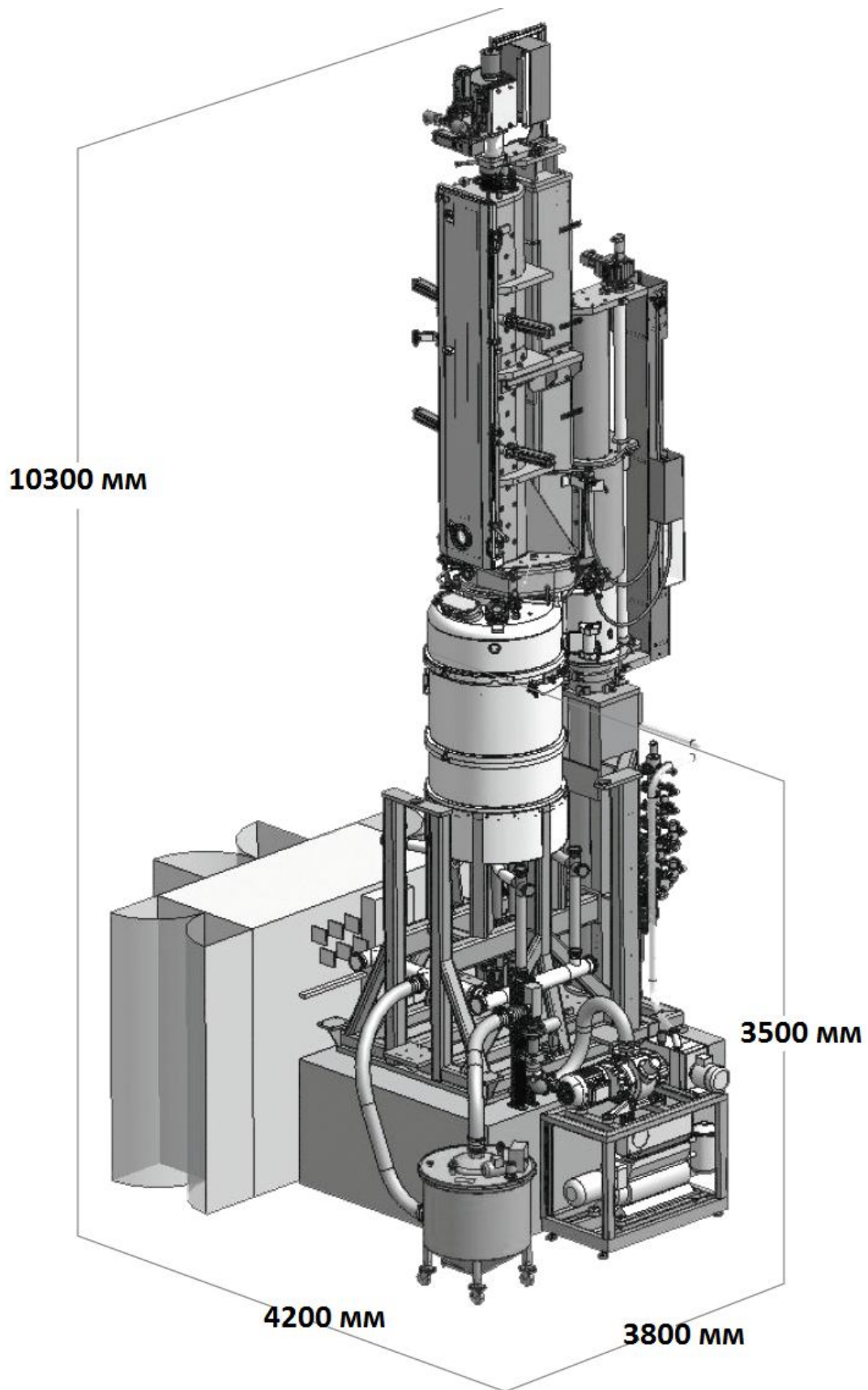


Рис. 6.16. Установка EKZ-3500 компании PVA TePla AG [269], габаритный чертеж

Таблица 6.5
Основные характеристики ростовой установки EKZ-3500

Наименование	Значение
Диаметр кристалла, мм	300
Длина кристалла, мм	2500
Скорость перемещения затравки, мм/мин	0,1÷1000
Частота вращения затравки, об/мин	0,5÷35,0
Погрешность поддержания скорости перемещения и частоты вращения затравки, %	±0,5
Рабочий ход тигля, мм	600
Скорость перемещения тигля, мм/мин	0,02÷200
Частота вращения тигля, об/мин	0,5÷35,0
Погрешность поддержания скорости перемещения и частоты вращения тигля, %	±0,5
Диаметр тигля, мм	610
Диаметр камеры, мм	940
Высота камеры, мм	1680
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	18
Давление охлаждающей воды на входе, МПа, не менее	0,4

Таблица 6.5 (продолжение)
Основные характеристики ростовой установки ЕКЗ-3500

Наименование	Значение
Расход аргона, л/ч, не более	7200
Рекомендуемое давление на входе в газовую систему, МПа	0,5
Рекомендуемое давление сжатого воздуха, МПа	0,6
Максимальная мощность на нагревателе, кВА	300
Габаритные размеры, мм: - длина - ширина - высота	4200 3800 10300
Масса, кг	10760

ГЛАВА 7. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОДУЛЕЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

7.1. Четырехуровневая структурная схема объекта проектирования

Сущность процесса проектирования заключается в разработке технологического процесса производства нового оборудования, с помощью которого с минимальными затратами и максимальной эффективностью можно получать монокристаллический кремний в требуемых условиях. В результате проектирования создаются новые, более совершенные агрегаты и модули, отличающиеся от своих аналогов и прототипов более высокой эффективностью за счет использования новых физических явлений и принципов функционирования, более совершенной элементной базы и структуры, улучшенных конструкций и прогрессивных технологических процессов.

Оборудование для производства монокристаллического кремния с заданными параметрами является весьма сложным техническим объектом, включающим большое число составных частей с многообразными связями между ними. Описание таких объектов в процессе их создания и использования должно быть согласовано с возможностями их восприятия человеком.

По характеру отображаемых свойств описания разделяют на функциональные, конструкторские и технологические.

Функциональное описание отображает материальную реализацию оборудования, его геометрические формы, расположение в пространстве, используемые материалы и компоненты и т.п.

Технологическое описание относится к методам и средствам изготовления

объекта проектирования.

Для упрощения восприятия описаний, их систематизации они разделяются на иерархические уровни. Каждый уровень описания отличается степенью детализации отображаемых свойств оборудования. На всех уровнях описания стремятся представить оборудование в виде совокупности связанных блоков, которые являются обособленными составными частями, причем это делается таким образом, чтобы отдельные блоки были самостоятельными материальными объектами. Каждый блок данного иерархического уровня описания представляет собой описание следующего, более низкого иерархического уровня, который в свою очередь представляется в виде совокупности блоков. Такое разукрупнение (декомпозиция) доводится до уровня, у которого составляющие блоки дальнейшему делению не подлежат.

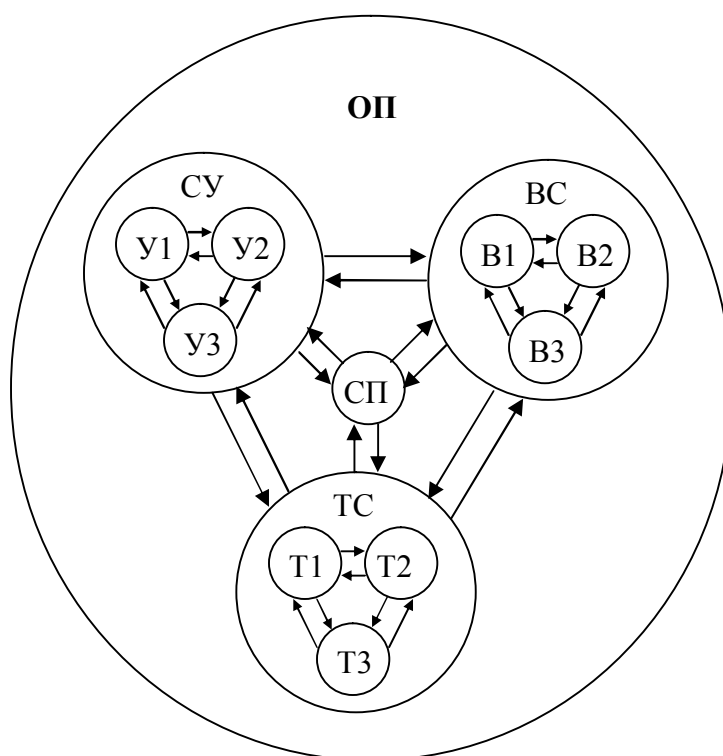


Рис 7.1 Структурная схема объекта проектирования

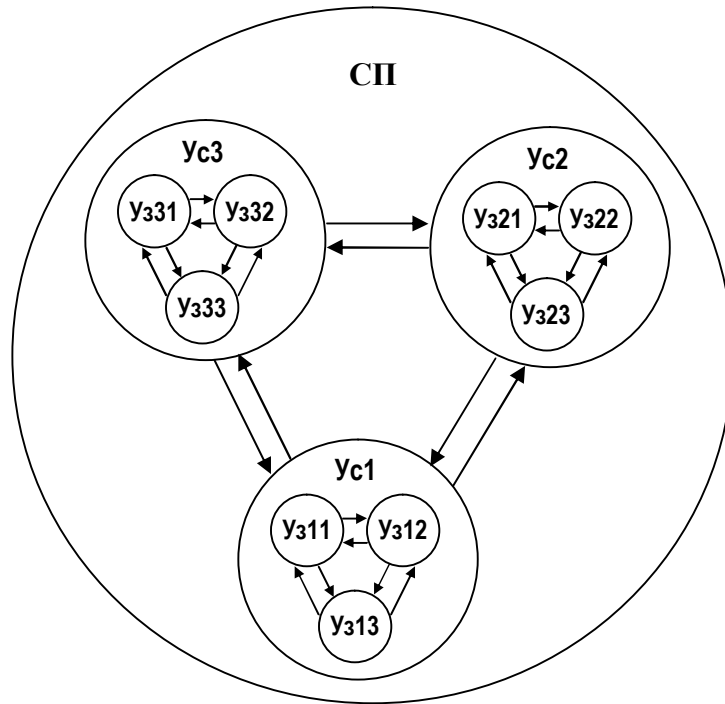


Рис 7.2 Структурная схема блока системы перемещений

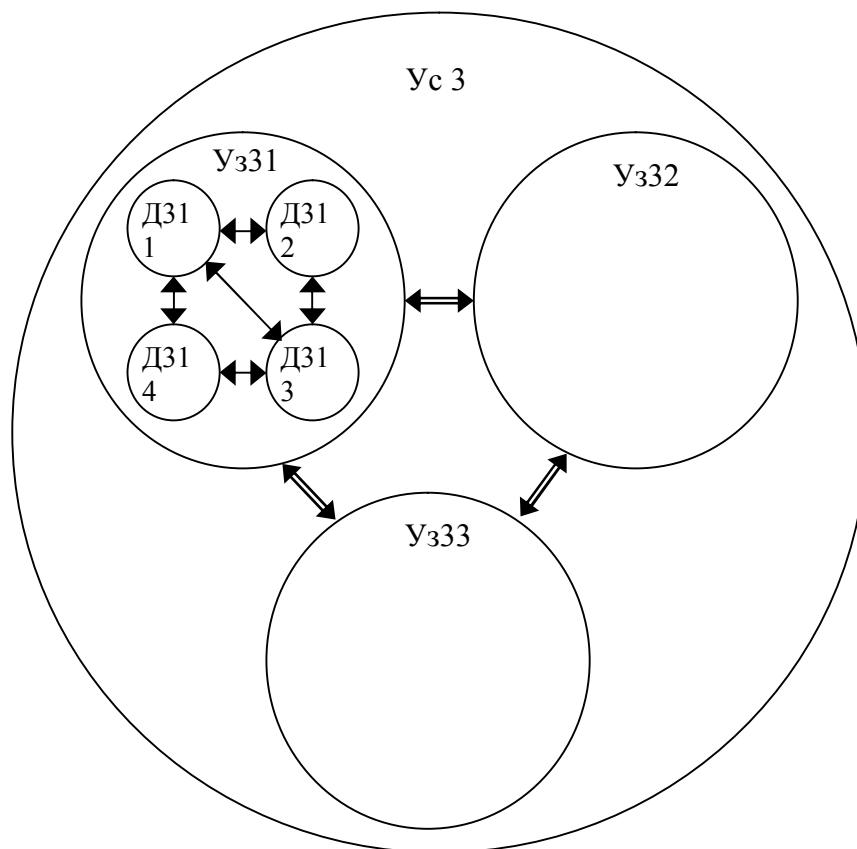


Рис. 7.3 Структурная схема устройства манипулирования

Контуром (рис. 7.1) выделен объект проектирования (ОП), состоящий из блоков: вакуумной системы (ВС), системы управления (СУ), технологической системы (ТС), системы перемещений (СП).

В (СП) (рис. 7.2) входят устройство транспортирования (Ус1), шлюзовое устройство (Ус2), устройство манипулирования (Ус3).

Устройство манипулирования (Ус3) (рис. 7.3) состоит из опорных узлов (Уз31), узлов смазки (Уз32) и узлов передачи движения (Уз33).

Узел передачи движения (Уз31) (см. рис. 7.2) включает в себя шарики (Д311); сепаратор (Д312); внутренне кольцо (Д313); наружное кольцо (Д314).

Нижний иерархический уровень представляет собой функционально законченную сборочную единицу, не имеющую самостоятельного эксплуатационного применения. Также может быть представлен в виде составных частей – компонентов, с определенными связями между ними, т.е. уровень может быть описан с различной степенью детализации, так же, как его компоненты.

Окончательное описание объекта проектирования как законченного изделия представляет собой полный комплект технической документации, включающий в себя текстовый материал, схемы, чертежи, рисунки, фотографии, технологические карты и т.п., оформленные в соответствии с требованиями ЕСКД. Этот комплект документации необходим для изготовления и эксплуатации оборудования. Он может быть выполнен как на традиционных бумажных, так и на машинных носителях.

Важную роль при проведении моделирования физических процессов, протекающих в оборудовании, играет его правильный порядок. Он определяется с одной стороны логикой проектирования объекта, а с другой взаимосвязью моделей физических процессов между собой.

Порядок проведения тех или иных работ в процессе автоматизированного проектирования регламентируются соответствующими алгоритмами.

Каждому уровню соответствует определенная математическая модель объекта проектирования.

7.2. Математические модели объекта проектирования

Математическая модель включает в себя совокупность математических элементов (чисел, переменных векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, которые с требуемой для проектирования точностью описывают свойства проектируемого объекта. На каждом этапе проектирования используется свое математическое описание проектируемого объекта, сложность которого должна быть согласована с возможностями анализа на ЭВМ, что приводит к необходимости иметь для одного объекта несколько моделей различного уровня сложности [25].

Описание объекта проектирования в форме математической модели должно включать следующие компоненты и правила:

S – цель функционирования;

$N\{n_d\}$ – множество элементов, составляющих систему;

$T\{t_c\}$ – множество элементов времени;

$\Pi_m\{\pi_m^k\}$ – множество признаков, характеризующих систему в целом на всех этапах жизненного цикла;

$\Pi_b\{\pi_b^c\}$ – множество признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла;

$D^e\{d_s^k\}$ – множество состояний элементов в рассматриваемый промежуток времени;

$W=D^e \times T$ – правило упорядочения состояний;

$V\{n_d, n_e\}$ – множество связей между всеми элементами системы;

$R: \{n_s^k = p^u (n_d^k)\}$ – математические схемы, описывающие отношения между признаками элементов и признаками систем;

$\Pi_a\{p_a\}$ – множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой;

$\Pi_0 = \text{ОП}_1 \rightarrow \text{ОП}_2 \rightarrow \dots \text{ОП}_L, l = \overline{1..L}$ – процесс проектирования;

$\text{ОП}_1, \text{ОП}_2 \dots \text{ОП}_L$ – описание объекта проектирования на разных этапах его разработки;

$\text{ОП}_1 = C_0 = \{c_1, c_2, \dots, c_u\}$ – целевое описание объекта проектирования;

$\text{ОП}_2 = \{C_0, \Pi_m\}$; – концептуальное описание объекта проектирования.

Функциональное описание объекта содержит множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой Π_a , и правило упорядочения смены состояний

$$W: \text{ОП}_3 = \{ \Pi_a, W \}.$$

Структурное описание системы включает следующие множества элементов, составляющих систему N ; признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла Π_B ; связей между всеми элементами системы V , т.е.

$$\text{ОП}_4 = \{ N, \Pi_B, V \}.$$

Динамическое описание включает математические модели, построенные на множестве признаков, определяющих взаимодействие системы со средой Π_a , множестве элементов времени T и математических схемах, описывающих отношения между признаками элементов и признаками системы:

$$\text{ОП}_5 = \{ \Pi_a, T, R : (\Pi_B^k = p_u (n_d^k)) \}.$$

Важный аспект проектирования оборудования – разработка наиболее экономичного для данных производственных условий варианта перехода от описания конструкции в виде математической модели к готовому изделию.

Математическую модель любого объекта характеризуют внутренними, внешними, выходными параметрами и фазовыми переменными. Внутренние параметры модели определяются характеристиками компонентов, входящих в

проектируемый объект. Каждый из параметров, в свою очередь, может быть функцией, вектором или еще более сложным математическим функционалом в зависимости от объекта проектирования.

Выходные параметры модели – это показатели, характеризующие функциональные, эксплуатационные, конструкторско-технологические, экономические и другие характеристики проектируемого объекта. К таким показателям могут относиться коэффициенты передачи, масса и габариты проектируемого объекта, надежность, стоимость и т.п. Понятие внутренних и выходных параметров инвариантно, при моделировании на более сложном уровне выходные параметры могут стать внутренними и наоборот.

Внешние параметры модели – это характеристики внешней по отношению к проектируемому объекту среды, а также рабочие управляющие воздействия.

Уравнения математической модели могут связывать некоторые физические характеристики компонентов, которые полностью характеризуют состояние объекта, но не являются выходными или внутренними параметрами модели (фазовые переменные). Использование вектора фазовых переменных позволяет упростить алгоритмическую реализацию программ, составляющих уравнения математической модели устройства.

На каждом уровне моделирования различают математические модели проектируемого объекта и компонентов, из которых состоит объект. Математические модели компонентов представляют собой системы уравнений, устанавливающих связь между фазовыми переменными, внутренними и внешними параметрами, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения являются компонентными, а соответствующую модель – компонентной.

Математическую модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе математических моделей компонентов, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных

физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия фазовых переменных. Уравнения, описывающие эти законы, называют топологическими, они отражают связи между компонентами в устройстве. Совокупность компонентных и топологических уравнений для проектируемого объекта образует систему, являющуюся математической моделью объекта.

Математические модели деталей и процессов на микроуровне отражают физические процессы, протекающие в сплошных средах и непрерывном времени. Независимыми переменными в этих моделях являются пространственные координаты и время. В качестве зависимых переменных выступают переменные, такие как потенциалы, напряженности полей, концентрации частиц, деформации и т.п. Взаимосвязи переменных выражаются с помощью уравнений математической физики – интегральных, интегродифференциальных или дифференциальных уравнений в частных производных. Эти уравнения составляют основу математических моделей на микроуровне [25].

Для получения законченной математической модели, используемой в задачах проектирования, необходимо дополнительно выполнить ряд процедур:

- выбрать краевые условия. Краевые условия представляют собой сведения о значении фазовых переменных и (или) их производных на границах рассматриваемых пространственных и временных областей;
- дискретизировать задачу. Дискретизация подразумевает разделение рассматриваемых пространственных и временных областей на конечное число элементарных участков с представлением фазовых переменных конечным числом значений в избранных узловых точках, принадлежащих элементарным участкам;
- алгебраизировать задачу – аппроксимировать дифференциальные и интегральные уравнения алгебраическими.

Используют два основных подхода к дискретизации и алгебраизации краевых задач, составляющих суть методов конечных разностей (МКР) и

конечных элементов (МКЭ). С помощью любого из этих методов формируется окончательная модель, исследуемая при выполнении различных процедур анализа проектируемого объекта. [35].

Пользователь автоматизированного проектирования средствами входного языка задает исходную информацию о конфигурацию проектируемого объекта, о способе дискретизации – разделения среды на элементы, о физических свойствах участков среды. Формирование модели объекта, т.е. разделение среды на элементы, выбор математических моделей элементов из заранее составленных библиотек, объединение моделей элементов в общую систему уравнений, так же как и решение получающихся уравнений, осуществляется автоматически на ЭВМ [35].

Основу большинства моделей объектов на микроуровне составляют дифференциальные уравнения. Общий вид дифференциального уравнения в частных производных (ДУЧП) [35].

$$L\varphi(Z) = f(Z), \quad (7.1)$$

где:

$Z = (t, x_1, x_2, x_3)$ – вектор независимых переменных;

$f(Z)$ – функция, выражающая заданные внешние воздействия на исследуемую среду;

L – дифференциальный оператор;

$\varphi(Z)$ – функция, определяемая природой описываемого объекта. [35]

В качестве L могут фигурировать также интегральные или интегродифференциальные операторы [35].

На макроуровень переход осуществляется путем выделения в моделируемом объекте конечного числа частей (элементов). Такое выделение можно представить как дискретизацию пространства, при которой из независимых переменных исключаются пространственные координаты. Вместо полей фазовых переменных $\varphi(Z)$ появляется конечное число фазовых

переменных $\varphi(t)$, каждая из которых относится к определенному элементу дискретизированного пространства.

При переходе к представлениям макроуровня (7.1) превращается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\psi(V, \dot{V}, t) = 0, \quad (7.2)$$

где V – вектор фазовых переменных, $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$.

Состояние объекта выражается значениями фазовых переменных. Типичные математические модели на макроуровне, представленные уравнениями (7.2) с заданными начальными условиями V_0 описывают непрерывные процессы смены состояний в исследуемом объекте. В частных случаях могут исследоваться только установившиеся состояния, тогда $\dot{V} = 0$, и (7.2) вырождается в систему алгебраических уравнений:

$$F(V) = 0. \quad (7.3)$$

Переход к представлениям верхних иерархических уровней для аналоговых и дискретных объектов осуществляется по-разному [35].

Исходя из задач конкретного этапа проектирования математическая модель проектируемого объекта должна отвечать самым различным требованиям: отражать с требуемой точностью зависимость выходных параметров объекта от его внутренних и внешних параметров в широком диапазоне их изменения; иметь однозначное соответствие физическим процессам в объекте; включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать ее программно на ЭВМ с различными возможностями; иметь большую универсальность, т.е. быть применимой к моделированию многочисленной группы однотипных устройств; быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов и т.п. Эти требования в своем большинстве являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далеким от

оптимальности в других. По этой причине для одного и того же компонента или устройства часто приходится иметь не одну а несколько моделей. В связи с этим классификация моделей должна выполняться по множеству признаков, чтобы описать все возможные случаи.

Математические модели должны удовлетворять требованиям:

- Адекватность;
- Универсальность;
- Экономичность.

Адекватность математических моделей

Модель считается адекватной, если отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров модели, и объекта. Пусть ε_j — относительная погрешность модели j -му выходному параметру:

$$\varepsilon_j = \frac{\tilde{y}_j - y_j}{y_j}, \quad (7.4)$$

где:

y_j — j -й и выходной параметр, рассчитанный с помощью модели;

y_j — тот же выходной параметр, имеющий место в моделируемом объекте [33].

Погрешность модели по ε_m по совокупности учитываемых выходных параметров оценивается одной из норм вектора $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)$

$$\varepsilon_m = \max |\varepsilon_j| \text{ или } \varepsilon_m = \sqrt{\sum_{j=1}^m \varepsilon_j^2} \quad (7.5)$$

Точность модели различна в разных условиях функционирования объекта. Эти условия характеризуются внешними параметрами. Если задаться предельной допустимой погрешностью $\varepsilon_{\text{пред}}$, то можно в пространстве внешних

параметров выделить область, в которой выполняется условие $\varepsilon_m < \varepsilon_{\text{пред}}$

Эту область называют областью адекватности (ОА) модели. Возможно введение индивидуальных предельных значений $\varepsilon_{\text{пред}j}$ для каждого выходного параметра и определение ОА как области, в которой одновременно выполняются все m условий вида $|e_j| \leq \varepsilon_{\text{пред}j}$.

Пример ОА (заштрихована) в двумерном пространстве дан на рис. 7.4. Здесь q_k – k -й внешний параметр [33].

Определение областей адекватности для конкретных моделей — сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат. Эти затраты и трудности представления ОА быстро растут с увеличением размерности пространства внешних параметров. Определение ОА – более трудная задача, чем, например, задача параметрической оптимизации, поэтому для моделей вновь проектируемых объектов ОА на рассчитывают [33].

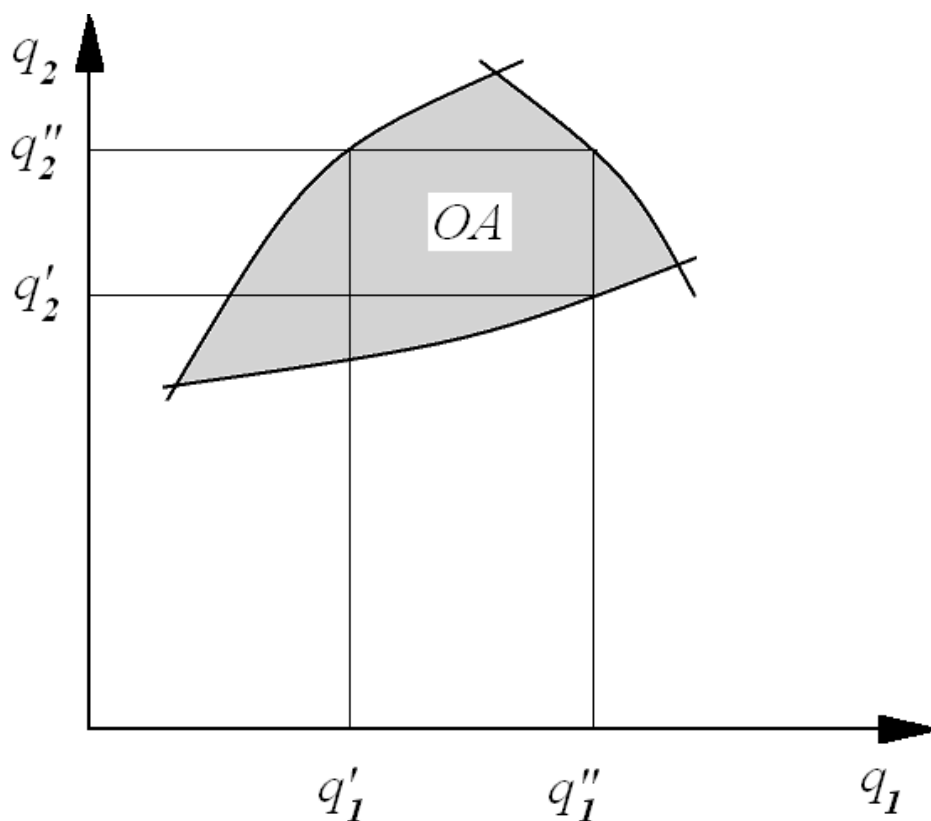


Рис. 7.4 Примеры области адекватности

Однако для моделей унифицированных элементов расчет областей адекватности становится оправданным в связи с однократностью определения ОА и многократностью их использования при проектировании различных систем. Знание ОА позволяет правильно выбрать модели элементов из числа имеющихся и тем самым повышать достоверность результатов машинных расчетов [33].

В общем случае ОА может иметь произвольную форму, сведения о которой выражаются громоздко, и неудобна в использовании, поэтому на практике вместо истинных ОА применяют те или иные их аппроксимации. Наиболее просто представляются и используются сведения об областях, имеющих форму гиперпараллелепипеда, который задается p двусторонними неравенствами:

$$q'_k \leq q_k \leq q''_k = \bar{1}, p$$

где p – размерность пространства внешних параметров.

В библиотеку моделей элементов наряду с алгоритмом, реализующим модель, и номинальными значениями параметров должны включаться пограничные значения внешних параметров q'_k и q''_k , задающие область адекватности [33].

На рис. 7.4 дано графическое представление области адекватности и аппроксимирующего ее гиперпараллелепипеда. Такое представление удобно для двумерных случаев.

Возможно использование и других аппроксимаций ОА, например, областей с линеаризованными границами в виде участков гиперплоскостей, областей в форме гиперсфер и т.п

Универсальность

При определении ОА необходимо выбрать совокупность внешних параметров и совокупность выходных параметров, отражающих учитываемые в

модели свойства. Типичными внешними параметрами при этом являются параметры нагрузки и внешних воздействий (электрических, механических, тепловых, радиационных и т.п.). Увеличение числа учитываемых внешних факторов расширяет применимость модели, но существенно удорожает работу по определению ОА. Выбор совокупности выходных параметров также неоднозначен, однако для большинства объектов число и перечень учитываемых свойств и соответствующих им выходных параметров сравнительно невелики, достаточно стабильны и составляют типовой набор выходных параметров. Например, для макромоделей оборудования для производства углеродных нанотрубок и фуллеренов такими выходными параметрами являются: одностенные нанотрубки, бездефектные, размеры нанотрубок.

Если адекватность характеризуется положением и размерами ОА, то универсальность модели определяется числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров [33].

Экономичность

Экономичность модели характеризуется затратами вычислительных ресурсов для ее реализации, а именно затратами машинного времени T_m и памяти P_m . Общие затраты T_m и P_m на выполнение в автоматизированном проектировании – какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

В большинстве случаев при реализации численного метода происходят многократные обращения к модели элемента, входящего в состав моделируемого объекта. Тогда удобно экономичность модели элемента характеризовать затратами машинного времени, получающимися при обращении к модели, а число обращений к модели должно учитываться при оценке экономичности метода решения [33].

Экономичность модели по затратам памяти оценивается объемом

оперативной памяти, необходимой для реализации модели.

Требования широких областей адекватности. Высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности, с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Это обстоятельство обуславливает использование в автоматизированном проектировании многих моделей для объектов одного и того же типа – различного рода макромоделей, многоуровневых, смешанных моделей и т.п. [33].

Математическая модель элемента, наиболее точно и отражающая свойства моделируемого объекта, называется полной моделью, а ММЭ, менее универсальные и точные, но более экономичные по сравнению с полной моделью, называются макромоделями [33].

7.3. Имитационное моделирование модулей ростового оборудования

В настоящее время при решении задач проектирования широко используется системный подход, основанный на последовательном переходе от общего к частному. При этом на каждом этапе используются модели различной степени детализации. Поскольку на начальных этапах достаточно сложно определить границы системы и внешней среды строится приближенная модель, которая последовательно уточняется на основе информации, получаемой в ходе модельных экспериментов. Таким образом, возникает задача преобразования модели предыдущего этапа к модели последующего применительно к целям исследования.

При рассмотрении вопросов, связанных с преобразованием моделей, особое внимание требуется уделить выбору инструментальных средств, которые обеспечивают возможность анализа структурных компонентов предыдущего уровня и переход к следующему уровню детализации. Различные виды представления систем на определенном уровне ставят задачу методологического характера для реализации комплексного подхода такого преобразования. Основной задачей в данном случае является выбор методики синтеза концептуального представления для интеграции разнородных информационных представлений реального мира. В качестве критерия эффективности построения такой модели можно определить ее роль в качестве посредника между группой лиц, осуществляющих неформализованные представления реального мира в формализованное, и средствами, отображающими эти представления в модель [35].

Глобальное инфологическое описание модели на концептуальном уровне может быть представлена как совокупность фрагментарных описаний и связывающих их отношений композиции. Данные отношения являются структурно-семантическими поскольку должны учитывать не только структурные связи между элементами, но и их семантические особенности.

Использование таких отношений позволяет решить вопросы естественности описания реального мира без сложной трансформации представлений и понятий [35].

Применение данного подхода и набора программных средств реализующих данные преобразования дает возможность получения иерархии моделей, на верхнем уровне которой – макромоделли, позволяющие оценить необходимые ресурсы и ограничения. По мере движения в глубь иерархии имеем более детальные модели, отражающие отдельные аспекты функционирования системы.

Для построения такой иерархии в работе предлагается использование имитационных моделей (ИМ). Методы имитационного моделирования позволяют в виде алгоритмов воспроизвести процесс функционирования проектируемой системы S с сохранением логической структуры и последовательности протекающих в системах процессов.

Технологическое описание построения моделей состоит из двух частей:

1. Инвариантной, в виде типовой схемы организации описания элементов модели, которая принята в используемой системе моделирования;
2. Предметной. В виде конкретного описания, применительно к особенностям данного элемента модели и предметной области.

Общие правила описания моделей требуют обязательное соблюдение условия принципа подобия, который может быть сформулирован следующим образом:

Моделируемая система S отображается в некоторый идеализированный образ системы $\text{Mod}(S)$ при помощи отношения φ_1 выражающее выделение и отображение отдельных структурных элементов, отношение φ_2 изоморфно отображает идеализированный образ в модель $\text{Mod}(\text{Mod}(S))$, которая представляет собой алгоритмическое описание процессов, происходящих в исследуемой системе.

Рассмотрим функционирование системы с точки зрения ее отображения в модель. Каждый алгоритм $A_j \in A$, описывающий функционирование отдельной компоненты (процесса) исследуемой системы в виде конечной последовательности функциональных операторов:

$$\varphi_{ij}, (X_{ij}, Y_{ij}), j = 1, m_i, \quad (7.6)$$

где m_i – число функциональных операторов, X_{ij}, Y_{ij} обозначают соответственно множества входных данных и множества результатов применения функциональных операторов.

При этом:

1. Функциональный оператор $\varphi_i(X_i, Y_i)$ считается функционально эквивалентным оператору $\varphi_j(X_j, Y_j)$ если из $(X_i = X_j) \rightarrow (Y_i = Y_j)$;
2. Функциональный оператор $\varphi(X, X)$, будем считать пустым функциональным оператором;
3. Функциональные операторы $\varphi_i(X_i, Y_i)$ и $\varphi_j(X_j, Y_j)$ являются функционально независимыми, если выполняется условие:
 $(X_i \cap X_j = \emptyset) \cap (Y_i, Y_j = \emptyset)$;
4. Под объединением операторов $\varphi_i(X_i, Y_i) \cup \varphi_j(X_j, Y_j)$ понимается оператор $\varphi_k(X_k, Y_k)$ в котором $X_k = X_i \cup X_j$ и $Y_k = Y_i \cup Y_j$.

Функциональная полнота модулей для решения задач в данной предметной области определяется возможностью построения алгоритма (модели) решения произвольной задачи из данной предметной области.

Автоматизация процесса построения моделей включает в себя две взаимосвязанные задачи:

- определение предметной области и описание элементов модели в терминах заданной предметной области;
- синтез модели на основании базовых операторов с использованием средств искусственного интеллекта (ИИ).

Одним из наиболее эффективных способов представления знаний о

предметной области является семантическая сеть, позволяющая учитывать особенности предметной области и объектного представления информации. Для получения необходимых данных об особенностях данной предметной области и объекте исследования привлекается группа экспертов. Очевидно, полученные и систематизированные знания экспертов содержат достаточное количество информации, обеспечивающее создание статической структуры ИМ на основе выбора и обоснования множества модулей, соответствующих функциональным операторам (7.6), а при наличии определенных дополнительных фактов, организацию управления моделью. Это позволяет решить первую из описанных выше задач, т.е. определить предметную область. Синтез модели требует выделения знаний необходимых, и существенных для данного уровня детализации и отобразить их на заданную структуру модели. Это требует, во-первых, выделить фрагмент сети, содержащий множество понятий и отношений, значимых для построения модели на данном структурном уровне, и, во-вторых, отобразить набор семантически связанных понятий в описание модели.

Поэтому для отражения особенностей предметной области, описание формулируется на основе сети элементов, которая структурно близка к семантическим сетям.

На логическом уровне сеть элементов задается пятеркой:

$$N = \langle I, X, K, Q, R \rangle \quad (7.7)$$

где:

I – имя сети;

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – множество элементов сети;

K – множество ключей сети N ;

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_s\}$ – множество типов бинарных отношений между элементами сети,

R – множество связей элементов сети.

Данное представление задает структуру сети и соответствующую модель данных. Кроме описания структуры необходимо определить набор операторов преобразования сети и поиска на сети. Реализация взаимодействия этих операторов осуществляется при помощи назначения каждому элементу сети (7.7) уникального ключа $k_i \in K$.

Множество типов отношений Q сети (7.7) не является строго фиксированным и в процессе формирования и преобразования сети может дополняться новыми. С теоретической точки зрения, в сети элементов роль типов бинарных отношений одинакова, однако, целесообразно выделение множества стандартных типов $Q_\tau \in Q$, которые могут создаваться автоматически при инициализации сети.

Определим множество элементов непосредственно связанных с некоторым элементом с ключом k_i :

$$Y(k_i) = \{k_j \mid \langle q_1, k_j \rangle \in R(k_i), q_1 \in Q, k_j \in K\}. \quad (7.8)$$

Собственно множество элементов ссылающихся на элемент с ключом k_i :

$$G(k_i) = \{k_j \mid k_i \in Y(k_j), k_i, k_j \in K\}$$

Приведенная модель определяет множество допустимых структур сетей элементов, соответствующих уровню детализации модели. Кроме описания структуры полная модель должна содержать множество операторов преобразования сети и поиска на сети. Выделим следующие группы:

- управление доступом;
- поиска по определенным условиям;
- преобразования;
- чтения и модификации элементов.

Для построения описания конкретной предметной области рассмотрим множество имен P , определяющих элементы x_i сети (7.7) и соответственно предметную область W .

Пусть данное множество разбито на непересекающиеся классы – C_i ($i=1,N$), соответствующие базовым понятиям B_i ($i=1,N$), которые характеризуют общие свойства каждого класса C_i . При этом можно выделить:

- понятия, обозначающие отдельные элементы и их части – P_0 ;
- понятия, обозначающие группу объектов, объединенных по некоторому признаку или группе признаков P_r .

Связанные между собой множеством отношений Q термины каждого класса образуют иерархическую структуру понятий. В зависимости от способа разбиения для класса понятий может быть выделено несколько иерархий. Любая из них обладает свойствами:

- вершинами являются понятия из $\{P\}$, а ребра отношений из $\{Q\}$;
- ветви, исходящие из любого узла, упорядочены в соответствии с $Y(k_i)$ (7.8);
- отношения Q транзитивны, антирефлексивны и антисимметричны;
- набор отношений постоянен для заданного уровня детализации;
- существует единственный корень в который не входит ни одного ребра и множество вершин, из которых не выходит ни одного ребра;
- иерархия «род–вид» имеет листья типа P_0 остальные вершины типа P_r ;
- иерархия «целое- часть» содержит все вершины типа P_0 ;
- в иерархиях с $Q^1=Q_2$, представляющих собой отношения вида «целое- часть» с одним корнем – множество листьев совпадает.

Все остальные отношения приводятся к классическим транзитивным отношениям Минского [38].

Зафиксируем множество иерархий предметной области W и рассмотрим некоторый информационный язык (ИЯ) отображения и обработки информации, существенной при построении модели заданного уровня детализации. Рассматриваемый язык должен включать множество понятий предметной области W , множество предикатов F , логические связки и кванторы.

Сложные выражения строятся в виде совокупности простых

высказываний, связанных логическими связками и кванторами. Простые высказывания, имеющие смысл в данной ПО, определяются как данные машинным представлением которых является база данных, содержащая множество таких высказываний.

Таким образом, на концептуальном уровне моделируемая система представляется в виде трех иерархий. Первая из них позволяет описывать моделируемые объекты в терминах класс–подкласс–событие–атрибут–значение. Вторая определяет структуру отдельных элементов модели в ходе имитационного эксперимента, третья определяет последовательность действий (событий) в ходе выполнения программы имитации.

Рассмотрим первую из этих иерархий, определяющих структуру (каркас) модели. С точки зрения теории систем [37] многоцелевая система содержит множество подсистем, имеющих собственные цели или цели подчиненные глобальной цели системы. В зависимости от взаимодействия этих целей определяются: терминальные собственные и несобственные подсистемы. При построении иерархии моделей и методов их формирования необходимо определить набор правил определяющих структурную связь системы со своими подсистемами. Например, отношение Y есть подсистема X задает частичный порядок на X не обладает связанностью, если система X и система X не имеет различающихся подсистем, то они считаются структурно эквивалентными при наличии общей подсистемы структурно толерантными. Исходя из этого, каждую подсистему целесообразно рассматривать в виде отдельной самостоятельной системы. Другое отношение «если подкласс или элемент класса» позволяет определить правила R выделения основных структурных особенностей моделируемой системы в описании сети (7.7) и сформировать соответствующее представление структуры модели.

Базовые отношения, относящиеся к множеству типовых отношений сети элементов (7.7) и правила R позволяют выделить множество элементов модели, требуемых для построения описания системы в виде модели на требуемом

уровне детализации.

Рассмотренный выше способ формирования описания элементов модели позволяет решить задачу автоматизации построения иерархии моделей в данной предметной области. Разработать средства автоматизации создания модели на требуемом уровне детализации. Выделять и формировать набор действий (событий) каждого структурного элемента для организации управления ходом моделирования, а также интерпретации результатов моделирования и представления этих результатов в требуемой форме.

7.4. Морфологический анализ в организации поиска технических решений модулей ростового оборудования

Морфологический метод позволяет на основе проанализированных основных конструктивных признаков группы устройств для получения наноматериалов. Выбрать альтернативные варианты исполнения и реализации оборудования. Комбинируя их между собой, получаем множество различных решений, которые представляют практический интерес [25].

Морфологический анализ включает операции, выполняемые алгоритмически. Сущность его состоит в расчленении общей функции проектируемого объекта на частные и в отыскании возможных способов их выполнения. То или иное сочетание способов выполнения всех частных функций и составляет вариант технического решения.

$$X_k = \bigcap_{i=1}^n u_{ij}; k = \bar{1}, \bar{m}; i = \bar{1}, \bar{n}; j = \bar{1}, \bar{\ell} , \quad (7.9)$$

где:

X_k – элемент множества технических решений;

X – полное множество технических решений;

u_{ij} – средство j выполнения функции I ;

U_i – множество средств выполнения функции i .

Если составлять варианты технического решения путем различных способов выполнения частных функций, то общее их число составляет

$$N_B = \prod_{i=1}^n k_i, \quad (7.10)$$

где n – число частных функций; k_i – число средств реализации частной функции.

Объект проектирования в ходе выполнения процедуры должен получить вначале функциональное, а затем структурное описание. Функциональная модель включает множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средней и правило упорядочения смены состояний в ходе достижения цели. Множество признаков взаимодействия системы со средой эквивалентно множеству частных функций [25].

Во всяком техническом устройстве имеется связь между причиной и действием, т.е. существует как минимум одна входная и одна выходная величина. Связь между ними зависит от ряда постоянных структурных и управляющих величин. На этой основе любое техническое решение может быть представлено схемой (рис. 7.5)

Функциональные элементы множества (см. рис. 7.5):

$W_{\text{вх}}$ – входная величина;

$W_{\text{вых}}$ – выходная величина;

$P(k)$ – постоянная структурная величина;

$Z(y)$ – управляющая величина.

Еще один подход к функциональному описанию, когда форма описания функции указывает лишь начальное состояние и конечный результат.

$$Y(S) = (S^H \rightarrow S^k), \quad (7.11)$$

где:

$Y(S)$ – функция рассматриваемой технической системы;

S^H – начальное состояние процесса производства;

S^K – конечный результат.

Естественная форма, включающая условия и ограничения;

$$Y(S) = ((S^H \rightarrow S^K), H_{(o)}), \quad (7.12)$$

где $H_{(o)}$ – особые условия и ограничения.

Естественная форма в виде трех компонент:

$$Y_{(S)} = (D_{(o)}, G_{(o)}, H_{(o)}), \quad (7.13)$$

где: $D_{(o)}$ – указание действия, производимого технической системой, приводящего к желаемому результату; $G_{(o)}$ – указание объектов, на которые направлено действие [25].

Естественное описание функции технической системы с выделением трех основных компонентов удобно и для автоматизированного поиска технических решений. В указанных действиях ($D_{(o)}$), объекта ($G_{(o)}$) и особых условиях ($H_{(o)}$) можно выделить ключевые слова, по которым произойдет обращение к банку данных, и информационно-поисковая система выдает по ним варианты технических решений [25].

Например, в компоненте $D_{(o)}$ ключевым словом можно выделить «температура», в $G_{(o)}$ – «давление», в $H_{(o)}$ – «ток дуги». По таким ключевым словам информационно-поисковая система выдаст ряд технических решений. Если же включить дополнительное ключевое слово «среда», то область технических систем сузится [25].

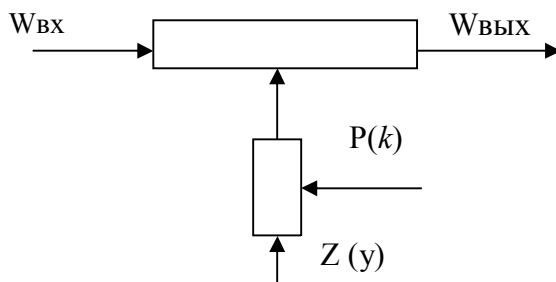


Рис. 7.5 Функциональная схема технического объекта

Действия ($D_{(o)}$) и объекты ($G_{(o)}$) в функциональном описании могут быть не единственными и к тому же объединенными логическими связями – конъюнкцией или дизъюнкцией.

Функционально-стоимостной анализ

В нем существует классификация любой технической системы.

Выделим четыре уровня:

I – общесистемные функции (главные и вспомогательные);

II – вспомогательные основные функции;

III, IV – внутренние главные и вспомогательные функции.

Успешно функционирующая система отвечает принципам совместимости, актуальности, сосредоточения и управляемости функций [25].

По этим принципам должны контролироваться разрабатываемые функциональные модели, которые рекомендуется строить в виде графа, ориентированного на указанные выше уровни [25].

Направление совершенствования функциональной модели связано с сокращением числа функций и увеличением их гибкости. Проверка функциональной модели на правильность группировки и распределения функций по видам может быть выполнена по методу, базирующемуся на применении детерминированной логики и использующему построение диаграммы функций, напоминающих сетевые графики [25].

По функциональному описанию строится структурное, включающее множество связей между элементами.

Указатель связывает функциональное назначение механизмов с их структурно-конструктивными признаками [25].

Поиск технических решений

Процедура поиска технических решений заключается в составлении функционального и структурного описания объекта проектирования. Функциональное описание строится на основе концептуального, причем

решающее значение имеет его головная часть. В зависимости от того, на что направлено проектирование на улучшение существующего оборудования, создание новой или обеспечение определенного состояния того или иного процесса, выбирается метод выполнения всей процедуры [25].

Для поиска технических решений возможно использование семантическое моделирование, т.е. исследование объекта на основе представления знаний о нем с применением логических и лингвистических переменных и средств логического вывода. Методы семантического моделирования используют специальный язык, формализующий аксиоматическое описание области поиска и обеспечивающий получение информации о техническом решении, принадлежащем этой области, логическим выводам.

Приемы и методы поиска технических решений по степени формализации делят на три группы:

- 1) неформализованные эвристические приемы и методы, состоящие из набора эвристик;
- 2) частично формализованные эвристические методы-эвритмы, часть операций, в которых описана в виде алгоритмов;
- 3) полностью формализованные приемы и методы-алгоритмы.

Названные группы весьма отличаются по численности входящих в них приемов и методов. Наиболее многочисленная первая группа. Она включает как общие (инвариантные) методы, применимые к объектам любой техники, так и частные, относящиеся к определенному классу технических систем и их элементов. Полностью формализованные методы (алгоритмы) составляют самую малочисленную группу и относятся лишь к конкретным объектам техники. Однако с развитием методики проектирования все большее число методов приходит из первой группы во вторую и из второй в третью. Автоматизированное проектирование строится на второй группе методов, а автоматическое – на третьей [32].

Эвристические методы рождаются в результате анализа уже выполненных проектных разработок. Некоторые из них являются сугубо индивидуальными, связанными с образом мышления конкретной личности.

Другие приемы и методы несомненно полезны всем, помогают преодолеть инерцию мышления, служат ориентирами в поиске технических решений.

Эвристические приемы. Они означают указание на то, как преобразовать имеющееся техническое решение для получения искомого. Большинство эвристических приемов включает две части. Первая – отвечает на вопрос «что изменить». Первая часть может содержать несколько переменных, а вторая – несколько способов их изменения. Поэтому приемы зачастую содержат несколько поисковых шагов. Полученный индивидуальный фонд можно пополнить в дальнейшем на основе собственного опыта и изучения соответствующего патентного фонда. При поиске технических решений, используя эвристические приемы, следует выполнить следующее:

- 1) уяснить цели проектирования, изложенные в техническом задании, и составить список признаков искомого технического решения;
- 2) выбрать из известных технических решений (если оно не задано) один или несколько прототипов, в наибольшей степени отвечающих списку признаков;
- 3) проанализировать прототипы, выявив несоответствие их признаков с искомым решением;
- 4) в соответствии с признаками, подлежащими изменению, выбрать наиболее подходящий прием из общего (межотраслевого) или индивидуального фонда, если он уже создан [25].

Следует иметь в виду, что зачастую задачу можно решить не сразу, а последовательно, улучшая результаты с помощью различных приемов. Метод эвристических приемов наиболее прост в освоении.

Метод поиска технических решений с помощью эвристических приемов

отражает идею «общего решателя задач». Как там, так и здесь имеется некоторый объект (прототип), к которому применяется преобразование (эвристический прием), после чего полученный результат сравнивается с целевым [32].

Метод гирлянд ассоциаций. В некоторых случаях, когда цель проектирования определяет единственный признак объекта – новизну, можно воспользоваться методом гирлянд ассоциаций. Для этого объекту подбираются синонимы (если это возможно), а затем случайным образом называют другие объекты и составляют комбинации из тех и других. Каждую пару объектов дополняют тем или иным признаком случайного объекта или ассоциации, которые они вызывают. Основным смыслом метода заключается в том, чтобы «расшатать» устоявшиеся представления об объекте. Конечно, подавляющее большинство комбинаций – объект (синоним), признаки и ассоциации – окажутся абсурдными. Однако, на практике 10÷15% комбинаций составляют интересные идеи [25].

Мозговой штурм. Метод организует коллективную работу конструкторов. Руководитель «собирает» группу специалистов не более 10 человек и ставит перед ними задачу поиска технических решений; удовлетворяющих определенным признакам. Каждый участник сеанса мозгового штурма, продолжающегося не более одного часа, может высказать любые идеи. Анализ и критика их во время сеанса не допускается. Основной девиз — чем больше идей – тем лучше. Если в ходе сеанса, по мнению руководителя, высказано мало идей, то он может быть повторен, возможно, с другим составом специалистов.

Синектика. Метод подобен мозговому штурму и отличается от него только тем, что основная задача сводится к обсуждению одного-двух вариантов технических решений, но с детальным их рассмотрением. В число группы включаются специалисты различных профессий.

Метод идеального объекта. Прежде, чем отыскать реальные технические решения. Рекомендуется пофантазировать, представить себе «идеальное» решение поставленной задачи. Самым идеальным будет такое решение, при котором ни проектировать, ни создавать объект не нужно, и в то же время вызывающая его потребность окажется удовлетворительной. В такой постановке задача уже ставилась на первом этапе проектирования. Если же все-таки нужно что-то создать, то лучше это сделать самым «простым» образом [25].

Выбрав идеальный объект или способ удовлетворения потребности, в дальнейшем надлежит установить препятствия к их реализации. В борьбе с этими препятствиями и следует построить поиск технических решений. Изложенный метод, несомненно, организует поиск. Однако представление идеального способа достижения цели в некоторых случаях и составляет основную трудность.

7.5. Методика выбора оптимального варианта технического решения модуля ростовой установки

Для того чтобы выбрать лучшее техническое решение нужно вначале дать оценку полученным вариантам, затем эти оценки сравнить и только после этого выбрать вариант с наивысшей оценкой.

Отображение множества вариантов технологических решений процесса производства на множество оценок и выбор оптимального из них:

$$(F: X \rightarrow V) \rightarrow \text{opt} . \quad (7.14)$$

Сравнивать варианты зачастую приходится по многим признакам, т.е. пользоваться несколькими шкалами. Причем по одной шкале лучшими оказываются одни варианты, по другой – иные [25].

Признаки, используемые для сравнения, неравнозначны: одни более

важны, другие – менее. Некоторые противоречивы.

Каждый вариант технического решения характеризуется некоторыми параметрами

$$p_j; j=\overline{1, n}. \quad (7.15)$$

Совокупность критериев для оценки вариантов:

$$V = \{v_i\}; i = \overline{1, m}$$

В качестве критериев выбираются признаки, отвечающие наиболее важным целям проектирования.

Одновременно достижение оптимума по всем критериям практически невозможно. Приходится идти на компромисс. В одних случаях это уравнивание критериев, а в других – выбор главного [25].

Компромисс упрощает решение задачи, сводя ее к однокритериальной.

Схемы компромиссов могут строиться на основе следующих принципов: равномерности, справедливой уступки, выделения главного критерия, последовательной уступки [25].

Принцип равномерности может требовать:

1) равенства всех критериев

$$\text{opt}_{V \in \Omega_i} = \text{opt}_{V \in \Omega'_i} V = \{\bar{v}_1 = \bar{v}_2 = \dots = \bar{v}_k\} \in \Omega_V^k, \quad (7.16)$$

где:

Ω_v – отображение области технических решений в пространстве V ;

$\text{opt}f$ – подмножество критериев, связанных с компромиссом;

v_i – оптимальное значение элемента множества критериев

2) «подтягивания» наихудшего из критериев

$$\text{opt}_{V \in \Omega_i^k} V = \max(\min v_i); \quad (7.17)$$

3) квазиравенства критериев, т.е. равенства с допустимой погрешностью.

Принцип справедливой уступки требует или абсолютной, или относительной уступки. Абсолютная уступка считается справедливой, если суммарный абсолютный уровень снижения одного или нескольких критериев не превосходит суммарного абсолютного уровня повышения других критериев. Это условие обеспечивает максимальную сумму критериев, т.е.

$$\text{opt } V = \max_{V \in \Omega_i^k} \sum_{i=1}^k v_i, \quad (7.18)$$

Ω_v – множество критериев, связанных с компромиссом;

V_i – значение i -ого критерия.

Процедура анализа принятого решения на этапе разработки технических предложений проводится в целях получения необходимой информации об объекте проектирования. В ходе анализа проверяются работоспособность объекта, особенности его взаимодействия с факторами окружения, взаимосвязи составляющих подсистем и элементов [58].

Интегральная величина затрат денежных средств на проектирование ИУ

$$\Phi(\tau) = \int_{\tau_n} P(\tau) d\tau, \quad (7.19)$$

$P(\tau)$ – суммарные затраты в функции времени; T_n – время проектирования.

Интегральная величина дохода за период эксплуатации T_3 ,

$$\Psi(\tau) = \int_{\tau} \Pi(\tau) d\tau, \quad (7.20)$$

$\Pi(\tau)$ – суммарный доход в функции времени; прибыль текущая

$$f(\tau) = \Pi(\tau) - P(\tau), \quad (7.21)$$

полная прибыль

$$F(\tau) = \int [\Pi(\tau) - P(\tau)] d\tau. \quad (7.22)$$

При выборе рациональных вариантов установок для получения монокристаллического кремния большинство возникающих задач оптимизации являются многокритериальными, так как функционирование установки должно удовлетворять многим критериям эффективности.

Основной концепцией, используемой при многокритериальной оптимизации, является концепция недоминируемых точек в пространстве решений и в критериальном пространстве (множество Парето) совместно с методикой последовательного сужения множества таких точек.

Рассмотрим паретовскую концепцию применительно к задачам дискретной и комбинированной оптимизации.

Функционирование установки $F(X)$ оценивается по p критериям качества f_1, f_2, \dots, f_p .

Задача оптимизации имеет вид:

$$F(X) = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)\} \rightarrow \min_{X \in D \subset R^n}, \quad (7.23)$$

где D – область допустимых решений (альтернатив устройств для получения монокристаллического кремния) является конечным и счетным.

$$X^0 \in D_p \stackrel{def}{\Leftrightarrow} \neg(\exists X \in D)$$

$$\left((f_i(X) \leq f_i(X^0), i = \overline{1, p}) \wedge \exists i_0 (f_{i_0}(x) < f_{i_0}(X^0)) \right). \quad (7.24)$$

Вариант установки $X^0 \in D$ является эффективным (недоминируемым, паретовским, неуплучшаемым), если в множестве допустимых альтернатив устройств D не существует решения, которое по целевым функциям было бы не хуже, чем X^0 , и, по крайней мере по одной целевой функции было бы строго лучше, чем X^0 [59].

Множество Парето в пространстве переменных (альтернатив вариантов установок) — это множество D_{Π} всех эффективных точек.

Множество Парето в критериальном пространстве (в пространстве

критериальных точек) – это множество:

$$\Pi = f(D_{\Pi}) = \left\{ (f_1(X), f_2(X), \dots, f_p(X)) \in R^0, X \in D_{\Pi} \right\}. \quad (7.25)$$

Для любого варианта установки, не входящей в множество Парето D_n , найдется вариант в множестве Парето, дающего по всем целевым функциям значения не хуже, чем у этого устройства, и хотя бы по одной целевой функции – строго лучше

Решение многокритериальной задачи оптимизации целесообразно выбирать из тождества Парето, так как любое другое, очевидно, может быть улучшено которой точкой Парето как минимум по одному критерию без ухудшения других критериев [59].

В общем виде иерархическую структуру технико-экономического проектирования может быть представлена следующим образом [8]:

$$\text{extr } F(X, Y) = \left\{ \left\{ \left\{ \left\{ f_{j_i, j_{i-1}}^{k_{j_i}} \left(X_{j_i, j_{i-1}} \right), \varphi_{j_{i-1}, j_{i-2}}^{\ell_{j_{i-1}}} \left(X_{j_i, j_{i-1}}, X_{j_{i-1}, j_{i-2}}, Y_{j_{i-1}, j_{i-2}} \right), \right. \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. k_{j_i} = 1, \dots, K_{j_i}, \ell_{j_{i-1}} = L_{j_{i-1}} \right\} \right\} \right\} \left. \right\} j_i = 1, \dots, M_{i, j_{i-1}} \left\} j_{i-1} = 1, \dots, M_{i-1} \right\} i = 1, \dots, I \};$$

$$G(X, Y) \leq B, C_{j_{i-1}} \left(X_{j_i, j_{i-1}}, X_{j_{i-1}, j_{i-2}}, Y_{j_{i-1}, j_{i-2}} \right) \leq B_{j_{i-1}} ;$$

$$\left\{ G_{j_i, j_{i-1}} \left(X_{j_i, j_{i-1}} \right) \leq B_{j_i, j_{i-1}}, j = 1, \dots, M_{i, j_{i-1}} \right\} j_{i-1} = 1, \dots, M_{i-1} ;$$

$$X_{j_i, j_{i-1}} \subset X_{j_{i-1}} \subset X, j_i = 1, \dots, M_{i, j_{i-1}}, j_{i-1} = 1, \dots, M_{i-1}$$

$$X_{j_i, j_{i-1}} = \varphi_{j_i, j_{i-1}} \left(X_{j_{i-1}} \right), X_{j_{i-1}, j_{i-2}} \cap Y_{j_{i-1}, j_{i-2}} = 0$$

где:

i – индекс уровня ЛПР (индекс уровня модели);

I – множество индексов уровней моделей;
 j_i – индекс модели i -го уровня;
 M_i – множество индексов моделей i -го уровня;
 j_i, j_{i-1} – индекс модели i -го уровня, подчиненной j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня;
 X – множество всех переменных всех моделей;
 Y – множество агрегатных состояний;
 $X_{j_{i-1}}$ – множество переменных моделей i -го уровня, подчиненных j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня;
 $X_{j_i}, X_{j_{i-1}}$ – вектор переменных j_i -й модели i -го уровня, подчиненной j_{i-1} -й модели $(i-1)$ -го уровня;
 $X_{j_{i-1}, j_{i-2}}$ – вектор переменных j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня, подчиненной j_{i-2} -й модели $(i - 2)$ -го уровня;
 $Y_{j_{i-1}, j_{i-2}}$ – множество переменных j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня не принадлежащих множеству X ;
 $f_{j_i, j_{i-1}}^{k_{j_i}}$ – k_{j_i} -й показатель выбора моделей i -го уровня, подчиненных j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня;
 K_{j_i} – множество индексов показателей выбора моделей i -го уровня, подчиненных j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня;
 $\varphi_{j_{i-1}, j_{i-2}}^{\ell_{j_{i-1}}}$ – $\ell_{j_{i-1}}$ -й показатель выбора j_{i-1} -й модели $(i - 1)$ -го уровня, не принадлежащий множеству показателей моделей i -го уровня;
 K_{j_i} – очевидно, множество индексов таких показателей;
 $G(X, Y)$ – общие ограничения для всех моделей;
 $G_{j_i, j_1}(X_{j_i, j_1})$ – ограничения на модели i -го уровня, подчиненные j_i, i -и модели $(i - 1)$ -го уровня.
 $G_{j_{i-1}}(X_{j_i, j_1}, X_{j_{i-1}, j_{i-2}}, Y_{j_{i-1}, j_{i-2}})$ – ограничения на j_{i-1} -ю модель $(i - 1)$ -го уровня.

Отметим некоторые соотношения между введенными понятиями.

$$M_{i,j_{i-1}} \in M_i, \bigcup_{j_{i-1}}^{M_{i-1}} M_{i,j_{i-1}} = M_i, M_{i-1} = M_{i-1,j_{i-2}} ;$$

$$X_{j_{i-1}} = \bigcup_{j_i} X_{j_i,j_{i-1}}$$

$$\{f_{j_{i-1},j_{i-2}}^{k_{j_{i-1}}}\} = \{f_{j_i,j_{i-1}}^{k_{j_i}}\} \cup \{\varphi_{j_{i-1},j_{i-2}}^{k_{j_{i-1}}}\} .$$

Одноуровневая и двухуровневая модели являются частными случаями построенной иерархической модели [9].

Одноуровневая модель принятия решений соответствует одному ЛПР (локальный выбор эффективных решений). Из общей модели она получается фиксированием индекса j_i :

$$\text{extr} \left\{ F_{j_i,j_{i-1}}(X_{j_i,j_{i-1}}) = \left\{ f_{j_i,j_{i-1}}^{k_{j_i}}(X_{j_i,j_{i-1}}) \right\} \quad k_{j_i} = 1, \dots, K_{j_i,j_{i-1}} \right\} ,$$

$$G(X, Y) \leq B, G_{j_i,j_{i-1}}(X_{j_i,j_{i-1}}) \leq B_{j_i,j_{i-1}} .$$

Двухуровневая модель получается из общей модели, если зафиксировать индекс некоторой модели $(i - 1)$ -го уровня и рассматривать все подчиненные ей модели. В этом случае мы имеем следующее формальное представление [39]:

$$\text{extr} F(X, Y) = \text{extr} F_{j_{i-1}}(X, Y) = \left\{ \left\{ f_{j_i,j_{i-1}}^{k_{j_i}}(X_{j_i,j_{i-1}}), \varphi_{j_{i-1},j_{i-2}}^{l_{j_{i-1}}}(X_{j_i,j_{i-1}}, X_{j_{i-1},j_{i-2}}, Y_{j_{i-1},j_{i-2}}) \right\} \right.$$

$$\left. k_{j_i} = 1, \dots, K_{j_i}, l_{j_{i-1}} = 1, \dots, L_{j_{i-1}} \right\} j_i = 1, \dots, M_{i,j_{i-1}} ;$$

$$G(X, Y) \leq B, C_{j_{i-1}}(X_{j_i,j_{i-1}}, X_{j_{i-1},j_{i-2}}, Y_{j_{i-1},j_{i-2}}) \leq B_{j_{i-1}} ;$$

$$\left\{ G_{j_i,j_{i-1}}(X_{j_i,j_{i-1}}) \leq B_{j_i,j_{i-1}}, j = 1, \dots, M_{i,j_{i-1}} \right\} ;$$

$$X_{j_i,j_{i-1}} = \varphi_{j_i,j_{i-1}}(X_{j_{i-1}}) .$$

Предложенная иерархическая структура технико-экономического

проектирования может быть использована при разработке информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса производства монокристаллического кремния.

7.6. Требования к стоимости научно-технической продукции

Требования к стоимости научно-технической продукции устанавливают предельное значение себестоимости разработки образца, превышение которого приводит к выводу о нецелесообразности выполнения его разработки. Себестоимость научно-технической продукции представляет собой стоимостную оценку используемых в процессе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) природных ресурсов, сырья, материалов, топлива, энергии, основных фондов, трудовых ресурсов, а также других затрат на выполнение соответствующих работ. В состав элементов себестоимости научно-технической продукции включаются затраты в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации от 5 августа 1992 г. № 552 «Об утверждении Положения о составе затрат по производству и реализации продукции (работ, услуг), включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг), и о порядке формирования финансовых результатов, учитываемых при налогообложении прибыли» (с изменениями и дополнениями). [51]

Себестоимость научно-технической продукции определяется по формуле

$$C_{\text{окр}} = C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{доп}} + C_{\text{ка}} , \quad (7.26)$$

где:

$C_{\text{мат}}$ – материальные затраты на выполнение работ по разработке образца (создание научно-технической продукции), включающие собственные прямые затраты разработчика на сырье и материалы (за вычетом возвратных отходов), затраты на покупные изделия, природное сырье, топливо и покупную энергию всех видов, потери от недостачи поступивших

материальных ресурсов (в пределах норм естественной убыли), тару и упаковку, полученную от поставщиков материальных ресурсов, а также расходы на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;

$C_{зп}$ – затраты на оплату труда (фонд заработной платы), включающие собственные прямые затраты на оплату труда основного производственного персонала предприятия, включая премии рабочим и служащим за производственные результаты, стимулирующие и компенсирующие выплаты, в том числе компенсации по оплате труда в связи с повышением цен и индексацией доходов в пределах норм, предусмотренных законодательством, компенсации, выплачиваемые в установленных законодательством размерах женщинам, находящимся в частично оплачиваемом отпуске по уходу за ребенком до достижения им определенного законодательством возраста, а также затраты на оплату труда не состоящих в штате предприятия работников, занятых в основной деятельности, обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам государственного социального страхования, пенсионного фонда, фонда медицинского страхования от затрат на оплату труда работников, включаемых в себестоимость продукции (работ, услуг) по элементу «Затраты на оплату труда» (кроме тех видов оплаты, на которые страховые взносы не начисляются);

$C_{доп}$ – дополнительные затраты, включающие собственные расходы разработчика по обслуживанию и управлению (накладные расходы), амортизационные отчисления на полное восстановление основных производственных фондов (как по собственным, так и по арендованным основным фондам), налоги, сборы, платежи (включая по обязательным видам страхования), отчисления в страховые фонды (резервы) и другие обязательные отчисления, производимые в соответствии с установленным законодательством порядком, платежи за выбросы (сбросы) загрязняющих

веществ, вознаграждения за изобретения и рационализаторские предложения, затраты на оплату процентов по полученным кредитам, оплата работ по сертификации продукции, затраты на командировки, подъемные, плата сторонним организациям за пожарную и сторожевую охрану, за подготовку и переподготовку кадров, затраты на организованный набор работников, на гарантийный ремонт и обслуживание, оплата услуг связи, вычислительных центров, банков, плата за аренду, амортизация по нематериальным активам, а также другие затраты, входящие в состав себестоимости продукции (работ, услуг), но не относящиеся к ранее перечисленным элементам затрат;

$C_{ка}$ – стоимость работ и услуг производственного характера, выполняемых сторонними предприятиями или производствами и хозяйствами предприятия, не относящимися к основному виду деятельности (контрагентских работ).

При определении лимитной цены научно-технической продукции стоимость контрагентских работ рассчитывается за исключением прибыли соисполнителя, исчисленной исходя из норматива, предусмотренного для соответствующего вида контракта по формуле

$$C_{ка} = Ц_{ка} : (1 + P) ,$$

где $Ц$ – цена научно-технической продукции, поставляемой соисполнителем работ.

Требования к стоимости научно-технической продукции, разрабатываемой в интересах создания образцов (пределной стоимости научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ), могут определяться следующими методами: альтернативным, предельно-результативным, интегральным, аналоговым, агрегатным.

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции *альтернативным методом* в качестве критерия используется соответствие

предстоящих полных затрат на создание образца дополнительным затратам по обеспечению требуемого уровня эффективности действующего оборудования. Основным условием целесообразности создания нового образца является выполнение неравенства:

$$Z_{\text{пр}}^{\text{д}} \geq Z^{\text{н}} \text{ при } \mathcal{E}_{\text{д}} = \mathcal{E}_{\text{н}} = \mathcal{E}_{\text{тр}} , \quad (7.27)$$

где:

$Z_{\text{пр}}^{\text{д}}$ – дополнительные затраты на действующее оборудование, необходимые для обеспечения требуемого эффекта ($\mathcal{E}_{\text{д}} = \mathcal{E}_{\text{н}}$);

$Z^{\text{н}}$ – затраты на создание нового оборудования при условии обеспечения им требуемой эффективности ($\mathcal{E}_{\text{н}} = \mathcal{E}_{\text{тр}}$).

Обязательным условием применения альтернативного метода является совпадение множества задач образца, для которого производятся расчеты, и образца, на замену которому он предназначен. В противном случае должен быть произведен анализ возможности выполнения задач, для которых предназначен новый образец.

Величина предельной стоимости НИОКР, исходя из условия (7.27), определяется выражением:

$$C_{\text{ниокр}}^{\text{пр}} = C_{\text{сп}}^{\text{д}} (N_{\text{д}} + N_{\text{ф}}) + Z_{\text{мод}}^{\text{д}} - C_{\text{сп}} N_{\text{н}} . \quad (7.28)$$

Дополнительные затраты на действующее оборудование складываются из затрат на закупку дополнительного количества образцов (N), необходимых для обеспечения требуемого эффекта, затрат на дозакупку образцов, отслуживших свой физический срок, а также на их модернизацию.

$$Z_{\text{пр}}^{\text{д}} = C_{\text{сп}}^{\text{д}} (N_{\text{д}} + N_{\text{ф}}) + Z_{\text{мод}}^{\text{д}} , \quad (7.29)$$

где:

$C_{\text{сп}}^{\text{д}}$ – цена единичного образца действующего оборудования;

$N_{\text{д}} = N_{\text{шт}} \left(\frac{\mathcal{E}_{\Sigma}^{\text{тр}}}{\mathcal{E}_{\Sigma}^{\text{шт}}} - 1 \right)$ – дополнительное количество действующего оборудования,

необходимое для получения заданного уровня эффективности;

$\left(\frac{\mathcal{E}_{\Sigma}^{\text{тр}}}{\mathcal{E}_{\Sigma}^{\text{шт}}} \right)$ – относительное требуемое изменение эффективности оборудования;

$N_{\text{шт}}$ – штатное количество действующего оборудования, обеспечивающее базовый уровень эффективности \mathcal{E} ;

$N_{\text{ф}}$ – количество образцов, которое необходимо закупить для пополнения количества оборудования до штатного состава взамен выбывшего в результате физического износа, определяется исходя из действующих норм расхода ресурса и продолжительности периода от начала эксплуатации первого образца до предельного срока окончания серийного производства образцов данного типа.

$Z_{\text{Мод}}^{\text{д}}$ – затраты на проведение модернизации действующего оборудования, включающие стоимость проведения НИОКР по его модернизации и затраты на проведение доработок действующих образцов, а также изменение стоимости дополнительно закупаемых модернизированных образцов.

Затраты на создание нового образца складываются из затрат на НИОКР ($C_{\text{ниокр}}$) и затрат на закупку необходимого количества новых образцов (N), обеспечивающих достижение требуемого эффекта.

$$Z^{\text{н}} = C_{\text{ниокр}} + C_{\text{сп}} \cdot N_{\text{н}}, \quad (7.30)$$

где:

$C_{\text{ниокр}}$ – стоимость научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), необходимых для создания нового образца;

$C_{\text{сп}}$ – цена нового образца;

$N_{\text{н}}$ – количество новых образцов, необходимое для достижения заданного уровня эффективности $\mathcal{E}_{\text{тр}}$.

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции *предельно-результативным методом* используется статистическая связь затрат на разработку и изготовление образцов. В качестве критерия применяется условие соответствия стоимости опытно-конструкторской работы, рассчитанной с учетом установленных нормативов удельного веса стоимости изготовления опытного образца в полной стоимости разработки для данного вида оборудования, и установленной лимитной цены серийного производства образца.

Величина предельной стоимости НИОКР определяется в соответствии с формулой

$$C_{\text{ниокр}}^{\text{т прр}} = \frac{Ц_{\text{сп}}^{\text{лим}}}{K_1 K_3 \xi_{00}}, \quad (7.31)$$

где

$Ц_{\text{сп}}^{\text{лим}}$ – лимитная цена изготовления образца, разработка которого производится в НИОКР. В случае если при выполнении ОКР предусматривается изготовление партии опытных образцов, в качестве $Ц_{\text{сп}}^{\text{лим}}$ используется суммарная стоимость образцов опытной партии, рассчитанная в соответствии с лимитной ценой серийного производства одного образца;

K_1 – коэффициент перехода от условий изготовления опытного образца (образцов) к условиям освоения серийного производства, учитывающий снижение стоимости образцов при изменении условий производства. При отсутствии специальных указаний применяется значение $K_1 = 0,71$.

K_3 – коэффициент перехода от условий освоения серийного производства к условиям освоенного серийного производства, учитывающий снижение стоимости образцов при освоении производства

ξ_{00} – удельный вес затрат на изготовление опытного образца (образцов) в полной стоимости разработки.

Таблица 7.1
Удельные коэффициенты для расчета стоимости НИОКР

Наименование	Коэффициент, учитывающий удешевление серийного образца относительно выпускаемых в первой партии	Удельный вес стоимости стадий разработки в полной стоимости НИОКР						
		научно-исследовательская работа	техническое предложение	эскизное проектирование	техническое проектирование	разработка конструкторской документации	изготовление опытного образца	государственные испытания
Вернем НИОКР специального назначения	0,84	0,09	0,03	0,07	0,20	0,47	0,09	0,05

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции *интегральным методом* в качестве критерия используется условие обеспечения ассигнований, выделяемых на разработку, таком объеме, чтобы с учетом необходимости закупки установленного количества образцов, не превысить суммарные лимиты ассигнований. Данный метод применяется только в случае формирования комплексной целевой программы создания объекта интеллектуальной собственности. При расчете требований к стоимости научно-технической продукции *интегральным методом* в качестве критерия используется условие обеспечения ассигнований, выделяемых на разработку, в таком объеме, чтобы с учетом необходимости закупки установленного количества образцов, не превысить суммарные лимиты ассигнований, выделяемые на программу создания образцов в составе комплексной целевой программы.

Расчеты производятся по формуле

$$C_{\text{ниокр}}^{\text{ти}} = C_{\Sigma}^{\text{пр}} - C_{\text{сп}}^{\text{лим}} N_{\text{тр}} , \quad (7.32)$$

где:

$C_{\Sigma}^{пр}$ – лимиты ассигнований, выделяемые на разработку и закупку установленного количества образцов;

$C_{сп}^{лим}$ – лимитная цена образца, разработка которого производится в НИОКР;

$N_{тр}$ – требуемое количество образцов.

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции аналоговым методом в качестве критерия используется условие обеспечения полной стоимости разработки образца на уровне затрат на разработку его аналога с учетом отличия применяемой элементной базы и условий выполнения работы.

Определение требований к стоимости разработки аналоговым методом осуществляется следующим образом.

Устанавливаются предельные собственные затраты организации-разработчика в усредненных условиях (условиях, соответствующих условиям разработки образца аналога) по формуле

$$C_{соб\ ср} = T_{л} \cdot Ч_{с} \cdot V_{с} , \quad (7.33)$$

где:

$T_{л}$ – предельная продолжительность разработки образца, определяемая как интервал времени от начала разработки до момента предельного срока ее завершения;

$Ч_{с}$ – планируемая среднегодовая численность основного производственного персонала, определяемая исходя из планируемой трудоемкости работ. Расчет планируемой трудоемкости работ производится в соответствии с требованиями тактико-технического задания по содержанию и объемам работ с учетом установленных действующим законодательством норм расходования рабочего времени;

$V_{с} = \frac{C_{окр\ соб}^{ан}}{Ч_{ан} T_{ан}}$ – среднегодовая выработка на одного работающего по аналогичным работам

где $C_{\text{окр соб}}^{\text{ан}}$ – стоимость собственных работ предприятия-разработчика по аналогичным НИОКР. При определении стоимости собственных работ предприятия-разработчика учитывается изменение экономических условий выполнения работ, а также исключается объем прибыли, полученной предприятием-разработчиком при выполнении аналогичной работы;

$Ч_{\text{с}}^{\text{ан}}$ – численность занятого выполнением аналогичной НИОКР основного производственного персонала;

$T^{\text{ан}}$ – продолжительность аналогичных НИОКР.

Данные по аналогичным НИОКР определяются на основании отчетной финансовой документации по выполненным договорам.

Определяется полная предельная стоимость НИОКР в усредненных условиях по формуле

$$C_{\text{окр}} = C_{\text{соб ср}} \cdot \frac{100}{g_{\text{соб}}}, \quad (7.34)$$

где $g_{\text{соб}}$ – удельный вес собственных работ в стоимости НИОКР-аналога.

Производится распределение полной предельной стоимости НИОКР в усредненных условиях по основным статьям калькуляции по формуле

$$C_{\text{окр}}^i = \frac{K_i}{100} C_{\text{окр}}, \quad (7.35)$$

где K_i – норматив затрат по i -й основной статье калькуляции, определяемый на основании складывающейся структуры затрат при разработке данного вида оборудования.

Ориентировочное распределение затрат по основным статьям калькуляции приведено в табл. 7.2.

Таблица 7.2
Ориентировочное распределение затрат

Статьи калькуляции	Удельный вес стоимости
Материалы и покупные комплектующие изделия	9,8
Специальное оборудование для научных (экспериментальных) целей	1,5
Основная заработная плата	25,6
Накладные расходы	19,7
Прочие производственные расходы (командировки)	0,8
Прочие расходы	0,1
Всего собственные расходы	57,5
Контрагентские расходы	42,5
Итого	100,0

Учитываются изменения величины материальных (материалы и покупные комплектующие изделия, специальное оборудование для научных (экспериментальных) целей) и трудовых затрат (основная заработная плата) при разработке образца, отличного от аналога, по элементной базе, обусловленные временным расстоянием и структурными отличиями организаций-разработчиков, по формулам

$$C_M = C_M^6 \cdot I_M, \quad (7.36)$$

$$C_T = C_T^6 \cdot I_{ЗП}, \quad (7.37)$$

где:

C_M^6 , C_T^6 – материальные и трудовые затраты на НИОКР, рассчитанные по формуле (7.35);

I_M , $I_{ЗП}$ – индексы изменения материальных и трудовых затрат, определяемые на основе статистических данных по структуре затрат на разработку образцов с применением различной элементной базы.

Производится расчет дополнительных затрат, соответствующих предприятию-разработчику рассматриваемого образца по формуле

$$C_{\text{доп}} = C_{\text{накл}} + C_{\text{ппр}} + C_{\text{пр}} , \quad (7.38)$$

где $C_{\text{накл}}$, $C_{\text{ппр}}$, $C_{\text{пр}}$ – накладные, прочие производственные расходы (командировки) и прочие расходы, определяемые в соответствии с действующим порядком расчета и установленными нормативами.

Производится расчет предельных собственных затрат предприятия-разработчика по формуле

$$C_{\text{соб}} = C_{\text{м}} + C_{\text{т}} + C_{\text{доп}} , \quad (7.39)$$

где: $C_{\text{м}}$, $C_{\text{т}}$, $C_{\text{доп}}$ – собственные материальные, трудовые и дополнительные расходы, рассчитанные по формулам (7.36 ÷ 7.38)

Производится расчет контрагентских расходов предприятия-разработчика по формуле

$$C_{\text{ка}} = C_{\text{соб}} \frac{g_{\text{ка}}}{g_{\text{соб}}} , \quad (7.40)$$

где:

$C_{\text{соб}}$ – собственные затраты предприятия, рассчитанные по формуле (7.39);

$g_{\text{ка}}$ и $g_{\text{соб}}$ – удельный вес контрагентских и собственных работ в стоимости НИОКР, определяемый в соответствии с табл. 7.1.

Определяются требования к стоимости НИОКР $C_{\text{ниокр}}^{\text{тан}}$ по формуле (7.26).

При расчете требований к стоимости научно-технической продукции *агрегатным методом* в качестве критерия используется условие обеспечения стоимости разработки образца не превышающей суммарную предельную стоимость проведения эскизного и технического проектирования, разработки конструкторской документации, а также изготовления и отладки опытного образца. Применение данного метода возможно при наличии технико-экономического обоснования (ТЭО) разработки образца, выполняемого и представляемого предприятием-разработчиком в соответствии с установленным порядком. В составе ТЭО представляются следующие

исходные данные:

- количество конструктивных элементов в составе разрабатываемого образца, в том числе оригинальных разрабатываемых, заимствованных из прошлых разработок, но серийно не изготавливаемых, освоенных в серийном производстве;
- действующие цены конструктивных элементов, освоенных в серийном производстве.

В случае разработки специального математического обеспечения, необходимого для функционирования образца или его элементов в составе ТЭО дополнительно представляются:

- количество разрабатываемых оригинальных команд;
- стоимость разработки одной команды на предприятии-разработчике;
- количество заимствованных из других разработок команд.

Команда — предписание, устанавливающее шаг выполнения: программы, совокупность элементарных действий, определяющих работу ЭВМ по обработке информации, например, сложение, а также обеспечивающих пересылку информации без выполнения каких-либо операций по ее обработке.

Установление требований к стоимости разработки стоимости ОКР агрегатным методом производится по формуле

$$C_{\text{ниокр}}^{\text{т агр}} = C_{\text{этп}} + C_{\text{оп}} + C_{\text{ркд}}, \quad (7.41)$$

где:

$C_{\text{ниокр}}^{\text{т агр}}$ — полная предельная стоимость НИОКР (без затрат на проведение государственных испытаний);

$C_{\text{этп}}$ — стоимость проведения эскизно-технического проектирования (формула (7.42));

$C_{\text{оп}}$ — стоимость изготовления и отладки опытного образца (формулы (7.46), (7.48));

$C_{\text{ркд}}$ — стоимость разработки конструкторской документации (формула (7.50)).

Стоимость проведения эскизно-технического проектирования определяется по формуле

$$C_{\text{этп}} = C_{\text{мо}} + C_{\text{ст}} + C_{\text{общ}}, \quad (7.42)$$

где:

$C_{\text{мо}}$ – стоимость разработки математического обеспечения (формула (7.43));

$C_{\text{ст}}$ – стоимость оснащения стенда (формул)

$C_{\text{общ}}$ – стоимость разработки общесистемной документации (формула (7.45)).

Определение затрат на математическое обеспечение производится по формуле

$$C_{\text{мо}} = C_{\text{к}} N_{\text{ориг}} + C_{\text{к}} \left(\frac{100 - \sum_{i=1}^n X_i}{100} \right) N_{\text{заим}}, \quad (7.43)$$

где:

$C_{\text{мо}}$ – предельная стоимость разработки математического обеспечения;

$C_{\text{к}}$ – стоимость разработки одной команды, рассчитываемая исходя из норм трудозатрат и стоимости нормо-часа в соответствии с установленным порядком обоснования трудовых затрат на предприятии-разработчике;

$N_{\text{ориг}}$ – количество разрабатываемых (единичных) оригинальных команд;

X_i – коэффициент, зависящий от этапа разработки программ, на котором производится заимствование программного обеспечения. Принимаются значения коэффициента в зависимости от этапа разработки программного обеспечения в соответствии с табл. 7.3.

$N_{\text{заим}}$ – количество заимствованных команд;

n – количество этапов разработки математического обеспечения, предшествующих тому этапу, на котором производится заимствование программного обеспечения.

Определение полных предельных затрат на оснащение стенда

производится по формуле

$$C_{ст} = C_{оп} \cdot K_{ст} , \quad (7.44)$$

где:

$C_{оп}$ – предельная стоимость изготовления опытного образца, рассчитываемая в соответствии с формулой (7.46);

$K_{ст}$ – коэффициент, учитывающий стоимость изготовления стенда, предназначенного для разработки образца. При отсутствии специальных указаний рекомендуется $K = 0,3 \div 0,6$.

Затраты на разработку общесистемной документации определяются по формуле

$$C_{общ} = C_{оп} \cdot K_{общ} , \quad (7.45)$$

где $K_{общ}$ – коэффициент, учитывающий затраты на общесистемную документацию, принимается $K_{общ} = 0,12$.

Таблица 7.3
Коэффициенты, применяемые при расчете стоимости разработки программного обеспечения

Этап разработки программы	Коэффициент X_1
Техническое задание	5,0
Блок схемы	10,0
Программирование	15,0
Транслятор	3,0
Автономная отладка	24,0
Комплексная отладка	25,0
Стыковка программ	2,0
Документирование	6,0
Опытная эксплуатация	8,0
Корректировка	2,0

Стоимость изготовления опытного образца определяется по формуле

$$C_{\text{оп}} = C_{\text{н}} + C_{\text{з}} + C_{\text{с}}, \quad (7.46)$$

где:

$C_{\text{н}}$ – полная предельная стоимость разрабатываемых устройств;

$C_{\text{з}}$ – полная предельная стоимость изготовления устройств, заимствованных из прошлых разработок, но серийно не изготавливаемых;

$C_{\text{с}}$ – стоимость устройств, освоенных в серийном производстве, в том числе стоимость вспомогательных устройств. Рассчитывается исходя из установленных цен на соответствующие элементы и их количества в составе образца.

Расчет предельной стоимости изготовления разрабатываемых и заимствованных из прошлых разработок элементов опытного образца производится по формуле

$$C_{(\text{н},\text{з})} = \sum_{i=1}^n C_{\text{сп}i}^{\text{лим}} \frac{1}{1+P} n_i, \quad (7.47)$$

где:

$C_{(\text{н},\text{з})}$ – предельная стоимость разрабатываемых (заимствованных) из прошлых разработок устройств;

$C_{\text{сп}i}^{\text{лим}}$ – лимитная цена i -го разрабатываемого (заимствованного) из прошлых разработок устройства;

P – норматив рентабельности;

n_i – количество конструктивных элементов.

Предельная стоимость отладки опытного образца определяется по формуле

$$C_{\text{отл}} = [C_{\text{оп}} - (C_{\text{з}} + C_{\text{с}})] \cdot K_{\text{отл}}, \quad (7.48)$$

где: $C_{\text{оп}}$ – стоимость изготовления опытного образца, рассчитанная по формуле (7.46); $C_{\text{з}}$ и $C_{\text{с}}$ – полная предельная стоимость изготовления устройств,

заимствованных из прошлых разработок, но серийно не изготавливаемых, и стоимость устройств, освоенных в серийном производстве, в том числе стоимость вспомогательных устройств; $K_{отл}$ – коэффициент на проведение отладочных работ. При отсутствии специальных указаний рекомендуется применять $K = 0,15 \div 0,2$.

$$C_{и} = C_{н} + C_{з} . \quad (7.49)$$

Предельные затраты на разработку конструкторской документации определяются по формуле

$$C_{рдк} = C_{и} \frac{g_{рдк}}{g_{и}} , \quad (7.50)$$

где

$C_{и} = C_{н} + C_{з}$ – полная предельная стоимость изготовления, разрабатываемых и заимствованных из прошлых разработок устройств в составе опытного образца, определяемая в соответствии с формулой (7.47); $g_{рдк}$ – удельный вес стоимости разработки конструкторской документации в стоимости НИОКР (см. табл. 7.1); $g_{и}$ – удельный вес стоимости изготовления опытного образца в стоимости НИОКР (см. табл. 7.1).

Подставляя в данные выражения $y = P : C$ и $x = t$ (с соответствующим индексом), и решая полученные соотношения относительно требований к стоимости (C_T^P), получаем окончательно:

$$C_T^P = \frac{P_{от}}{\frac{P_{01}}{C_1} = \left(\frac{P_{02}}{C_2} - \frac{P_{01}}{C_1} \right) \left(\frac{t_{тр}}{t_2} - \frac{t_1}{t_1} \right)} , \quad (7.51)$$

где:

C_T^P – требование к стоимости разработки образца;

$P_{от}$ – требуемое значение комплексного показателя технического уровня

образца, для которого производятся расчеты;

t_1 и t_2 – время появления базовых образцов, определяющих тенденцию развития данного типа образцов. Допускается использование в качестве базовых образцов, на замену которых предназначен анализируемый образец;

$t_{тр}$ – заданный момент времени (планируемый срок окончания разработки образца, для которого производятся расчеты);

P_{01} , C_1 и P_{02} , C_2 – значения комплексного показателя технического уровня и стоимости для базовых образцов двух последовательных поколений образцов, предшествующих расчетному.

Определение стоимости производится с учетом отличий экономических условий формирования цен базовых образцов и условий проведения расчетов за вычетом прибыли, определяемой по нормативу, действующему на момент появления базовых образцов.

При невозможности определения комплексного показателя технического уровня допускается использование частных показателей, определяющих технический уровень образца или иных показателей, отражающих потребительские качества (полезность) образцов для потребителя.

При расчете требований к стоимости серийного производства *аналоговым методом* в качестве критерия для данного метода используется условие обеспечения величины цены образца на уровне, обеспечивающем плату за его полезность не хуже сложившейся в анализируемой совокупности образцов-аналогов (базовых значений платы за полезность).

Под показателем полезности образца Q понимается комплексный показатель технического уровня образцов или иной показатель, отражающий потребительские качества (полезность) образцов для потребителя.

В качестве базовой платы за полезность C используется действующая (прогнозная) цена образцов в анализируемой совокупности образцов-аналогов с учетом отличия экономических условий ее формирования от условий в момент проведения расчетов.

Для получения функции C^Q базовых значений платы за полезность используется следующий алгоритм:

По принципу Парето отбираются образцы одного типа, обладающие наилучшим соотношением между C и Q (Парето-оптимальная выборка). Остальные образцы из совокупности, используемой для построения функции базовых значений платы за полезность, исключаются.

Процедура отбора образцов в Парето-оптимальную выборку заключается в следующем:

- для совокупности образцов-аналогов определяются уровни показателя полезности Q и величины, обратной показателю платы за полезность $1/C$,
- из состава образцов-аналогов выбирается произвольный образец, который по этим показателям попарно сравнивается с остальными образцами-аналогами;
- для пар сравниваемых образцов проверяется выполнение условия:

$$\begin{cases} Q_i \geq Q_j \\ \frac{1}{C_i} \geq \frac{1}{C_j} \end{cases}, \text{ причём } Q_i > Q_j \text{ или } \frac{1}{C_i} > \frac{1}{C_j} \quad (7.52)$$

Здесь индексы i и j соответствуют номерам сравниваемых образцов:

- образец, для которого в процессе попарного сравнения оба показателя окажутся ниже, чем у выбранного, из дальнейших расчетов исключается. Если условие (7.52) не выполняется для выбранного вначале образца, он из дальнейших сравнений исключается, а затем сравнение производится с тем образцом, для которого условие (7.52) при этом выполнено;
- процедура сравнения прекращается, когда условие (7.52) не может быть выполнено ни для одной из пар, не исключенных из расчетов образцов-аналогов. Оставшиеся образцы образуют Парето-оптимальную выборку.

Функциональная зависимость (Рис.7.6) принимается за основу поиска путей реализации предлагаемых технических решений. Далее новые технические и технологические решения бурно внедряются и происходит

быстрое нарастание эффективности данной технологии (зона Б). И, наконец, когда возможности технологии исчерпываются (достигается предел), происходит снижение темпов роста эффективности, сопряженное с непропорциональным ростом затрат на получение прироста эффекта (зона В).

Можно строго показать, что оптимальное соотношение эффекта и затрат достигается в точке I (где проходит касательная к S-образной кривой, выходящей из начала координат) и, следовательно, целесообразно проводить развитие технологии именно до этого момента.

Общая закономерность развития заключается в том факте, что предел, достигнутый для одной технологии, не означает отсутствия другой технологии, способной решить проблему более эффективным способом. Именно поэтому, как правило, параллельно развитию действующей технологии происходит разработка атакующей технологии, приходящей ей на смену.

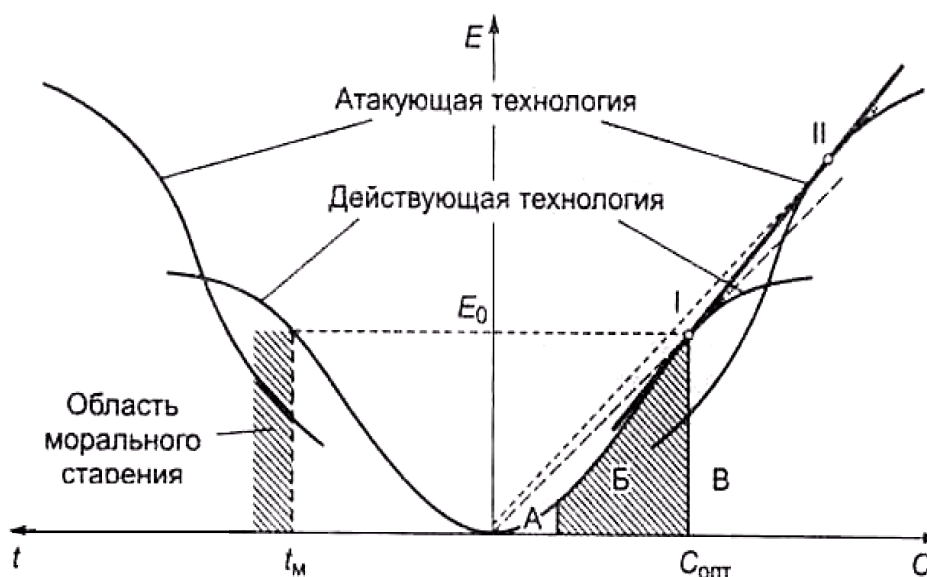


Рис. 7.6 Вид функциональной зависимости результата (эффекта), достигаемого при развитии технологии от затрат на его достижение и времени

В совокупности сказанное приводит к следующим заключениям:

1. Закономерности, вытекающие из S-образной кривой, являются всеобщими и позволяют на основе эмпирических наблюдений динамики параметров в сопоставлении с затраченными усилиями высказать соображения о пределах данных параметров и предвидеть, насколько и какой ценой можно достичь улучшения. Вместе с тем практическое применение S-образной кривой сопряжено с существенными трудностями, прежде всего с необходимостью анализа большого объема специально подобранной исходной информации, получение которой представляется весьма затруднительным.
2. Существует фактор, приводящий к перманентному снижению соотношения полученного эффекта и затрат для отдельно взятой технологии, вызванного появлением и внедрением технологий, обладающих более высокой эффективностью. Этот фактор можно назвать моральным старением.
3. Наиболее целесообразным способом развития может считаться прогнозирование моментов наступления технологических разрывов и реализация проектов с применением атакующих технологий именно в такие моменты времени [51].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить следующее.

Разработка новых видов агрегатов и модулей высокопроизводительного ростового оборудования на сегодняшний день является важнейшей задачей точного машиностроения в связи с постоянным ужесточением требований к производительности оборудования и качеству выпускаемой продукции.

Снижение себестоимости монокристаллов полупроводников возможно за счет рационального использования сырья, основных и вспомогательных материалов и увеличения выхода готовой продукции в результате внедрения в производство принципиально новых технологических процессов и оборудования, рассчитанных на повышенную загрузку исходного материала в тигель. При этом, современным подходом к созданию ростового оборудования для выращивания монокристаллического кремния является агрегатно-модульное построение промышленных установок.

Предложенная модель формирования погрешностей в волновых модулях ростового оборудования позволяет создать методику выбора рациональной конструкции волновой зубчатой передачи и ввода, волновой резьбовой передачи и ввода с минимальной величиной угловой и линейной погрешностей позиционирования механических модулей ростового оборудования.

В монографии предложены модели формирования привносимой дефектности от модулей перемещения в технологическом агрегате ростового оборудования, обеспечивающие возможность получения диагностических данных о количестве и размерах микродисперсных частиц износа, влияющих на качество проведения выращивания монокристаллического кремния.

Разработанная математическая модель виброзащитного модуля ростового оборудования на шесть степеней подвижности позволила создать методику определения собственных частот и коэффициентов демпфирования виброзащитного модуля, необходимых для реализации условий гашения колебаний,

при которых отношение частот собственных колебаний к частоте вынужденных более $\sqrt{2}$.

Предложенные технические решения приводов, механизмов и устройств отвечают критериям качества по привносимой дефектности, кинематическим и динамическим параметрам работоспособности агрегатов и модулей ростового оборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов И.Г. Кожитов Л.В. Оборудование полупроводникового производства – М.: Машиностроение, 1986 – 264 с., ил.
2. Бузунов А.И., Калугин А.Я. и др. АС СССР № 1773955 «Способ получения монокристаллов кремния». Опубл. 07.11.92. // Б.И. ; 41.
3. Качергина Л.Ф., Колмаков В.А. и др. Патент РФ № 2095494 «Установка для получения стержней поликристаллического кремния». Опубл. 10.11.97 // Б.И. № 31.
4. Гупалов В.К. и др. Патент РФ № 2205905 «Установка для получения стержней поликристаллического кремния». Опубл. 10.06.03 // Б.И. № 16.
5. Бузунов А.И. и др. Патент РФ № 2052547 «Устройство для выращивания монокристаллического кремния». Опубл. 20.01.96. // Б.И. № 2.
6. Кочергина Л.Ф., Куценогий Л.К., Петров С.И. Патент РФ №2088702 «Устройство для выращивания кристаллов из расплава». Опубл. 27.08.97. // Б.И. № 24.
7. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. – М.: Высшая школа, 1986.
8. Антамошкин А.Н. и др. Системный анализ: Проектирование, оптимизация и приложения: Учебное пособие. В 2-х томах. Том 1. – Красноярск: Сибирская Аэрокосмическая академия, 1996. – 206 с., ил.
9. Антамошкин А.Н. и др. Системный анализ: Проектирование, оптимизация и приложения: Учебное пособие. В 2-х томах. Том 2. – Красноярск: Сибирская Аэрокосмическая академия, 1996. – 290 с., ил.
10. Вейник А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. – Москва 1965 г.: Металлургия.
11. Салли И.В., Фалькевич Э.С. Производство полупроводникового кремния. Издательство «Металлургия», 1970, с 152.

12. А.Г. Денисов, Н.А.Кузнецов, В.А.Макаренко. Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии. – М. 1981. – 52с. Сер.7. Технология, организация производства и оборудования: Обзор по электронной технике; Вып. 17 (828).
13. Василенко Н.В., Ковалев Л.К. Механические системы вакуумного технологического оборудования для производства изделий квантовой электроники. Ч. 2. Расчет и конструирование цельнометаллических вводов движения // Обзоры по электронной технике. Сер. II, Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1984. – Вып. 1 (1015). – 48 с.
14. Создание волновых вводов возвратно-поступательного движения для установок жидкофазной эпитаксии: Отчет о НИР (заключ.) / Краснояр. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – Шифр темы ДМ 120; № ГР 80030722; инв. №60012. – Красноярск, 1983. – 250с.
15. Вакуумные системы и их элементы А.С. Фролов, Ф. А. Русак и др. – М.: Машиностроение, 1968. – 189с.
16. Марусов В. А. Создание и исследование герметичных механизмов поступательного движения для сверхвысоковакуумного автоматизированного технологического оборудования: Дисс. канд. техн. наук / МВТУ им. Н. Э. Баумана). – 1981. – 200с.
17. Кисельман Л. А., Томашевский А. Г. Элементно-конструктивная база установок электронной и ионной спектроскопии и молекулярно-лучевой эпитаксии // Электронная промышленность. – 1978. - №11 – с.102.
18. Ковалев Л. К. Вакуумное оборудование для производства тонкопленочных структур квантовой электроники. Сер. 11. Лазерная техника и электроника: Обзоры по электронной технике; Вып. 2. (886).
19. Создание волновых передач для манипуляторов, работающих в сверхвысоком вакууме: Отчет о НИР (заключ.) / Красн. политехн. ин-т; руководи-

- тель Н. В. Василенко. – шифр темы 120; № ГР 79045890; инв. № 53451. – Красноярск, 1982. – 278с.
20. Разработка установки с лазерным испарителем для контроля ОЖЕ – спектрометром состояния поверхности получаемых пленок: Отчет о НИР (заключ.) / Краснояр. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – Шифр темы 220; № ГР Ф 11129; инв. № 60028. – Красноярск, 1981. – 101с.
 21. Александрова А. Т. Исследование процессов дестабилизации параметров системы механизм – контролируемая среда и разработка теоретических основ проектирования оптимальных механизмов: Автореф. дис. докт. техн. наук./ МИЭМ – М., 1976, 46с., ДСП.
 22. Василенко Н. В. Исследование кинематических и прочностных характеристик волновой передачи винт- гайка для вводов движения в вакуум оборудования электронной техники. Дис. канд. техн. наук. / МИЭМ – М., 1978. – 220с., ДСП.
 23. Деулин Е. А. Исследование вводов вращения высоковакуумного напылительного оборудования с целью создания унифицированных конструкций. Автореф. дис. канд. техн. наук. / МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1971, 17с., ДСП.
 24. Медников М. И. Вводы движения в вакуум. – М.: Машиностроение, 1974. – 184с.
 25. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении.-Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1989.-225с.,ил.
 26. Усольцев М. В. Исследование кинематики и КПД вакуумных муфт для приводов электровакуумного и полупроводникового оборудования. Автореф. дис. канд. техн. наук. / МИЭМ. – М., 1974. – 16с. ДСП.
 27. Александрова А. Т. Новые способы передачи и формирования движения в вакууме. – М.: Высшая школа, 1979. – 69с.

28. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники / Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 715с.
29. Кульбачный О. И. Механизмы для передачи вращения из герметизированного объема и их сравнительный анализ // Проектирование зубчатых механизмов. – М.: Машиностроение. – 1971. – С. 107-132.
30. Рот А. Вакуумные уплотнения / Пер. с англ. – М.: Энергия, 1971. – 464 с.
31. Турышев В. А., Василенко Н. В. Волновые герметичные передачи винт-гайка. Научные основы автоматизации производственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении // Тех. Докл. (МВТУ им. Н. Э. Баумана). – МВТУ, 1979. – С. 53-56.
32. А. с. № 634046 СССР, М. Кл.⁴ F16 H 57/00 Волновая герметичная муфта Турышев В. А., Василенко Н. В., Нестеренко В. В., / Оpubл. в Б. И. 25.11.78.
33. Корячко В.П. и др. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов/ В.П.Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М.:Энергоатомиздат, 1987.- 400с., ил.
34. Разберн Ф. Справочник по вакуумной технологии / Пер. с англ.; Под ред. Проф. Р. А. Никлондра. – М.: Энергия, 1972. – 441с.
35. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР: Учеб. Для втузов.- М.: Высш. Шк. 1990. -335с., ил.
36. Данилин Б. С., Минайчев В. Е., Пупко В. А. Сверхвысоковакуумная напылительная установка // Обмен опытом в электронной промышленности. – 1968. - № I. – С. 12-13.
37. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. – М.: МИР., 1973. – 344с., ил
38. Минский М. Фреймы для представления знаний.-М.: Энергия, 1979. – 151с., ил.

39. Анализ путей развития оборудования для нанесения тонких пленок в вакууме / С. А. Ашинов, И. Г. Блинов, Е. А. Деулин и др. – М.: ЦНИИЭлектроника, 1978. – 69с.
40. Данилин Б. С., Минайчев В. Е. Некоторые вопросы вакуумной техники при напылении тонких пленок // Физика металлических пленок. – Киев, 1969. – С. 77-87.
41. Морозов В. В. Исследование автоматизированных электровакуумных установок выращивания монокристаллов из сплавов для постоянных магнитов с целью повышения их производительности. – Дис. канд. техн. наук. / ВПИ. – Владимир, 1979. – 190 с.
42. Гридиев А. И. Исследование и разработка систем автоматического регулирования температуры в установках для выращивания монокристаллов из сплавов для постоянных магнитов. – Дис. канд. техн. наук. / НПИ. – Новочеркасск, 1971. – 184 с.
43. Фомин В. М., Шевцов М. А. Электромеханическое оборудование за рубежом. По материалам второй Международной выставки Электро-77// Электротермия, - 1977. – Вып. 10 (182). – С. 15.
44. Преснов В. И., Жданов Ю. Ф. Установка безмасляной бесштенчельной откачки // Тез. 7-й Всесоюзной науч. техн. конф. По диффузионной сварке. – М., 1972. – С. 93-97.
45. Установка бесштенчельной откачки электровакуумных приборов. Г. В. Конюшков, В. И. Ерекин, М. И. Федоров и др. // Обмен опытом в электронной промышленности. – 1967. - № 7. – С. 34-38.
46. Павлов Б. И. Механизмы приборов и систем управления. – Л.: Машиностроение, 1972. – 205 с.
47. Василенко Н. В., Турышев В.А. Волновой резьбовой герметичный ввод // Машиностроение; Вып. 7 – Красноярск, 1973. – С. 42-46.
48. Хруничев Ю. А. Унификация и агрегатирование при разработке оборудования электронной техники // Научные основы автоматизации производ-

- ственных процессов и управления качеством в машиностроении и приборостроении: докл. (МВТУ им. Н. Э. Баумана). – МВТУ, 1979. – С. 14-16.
49. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1982. -203 с.
 50. Волновые герметичные передачи-муфты / Сост. В. А. Турьшев, Н. В. Василенко, В. В. Нестеренко; КрПИ Красноярск, 1982. – 20с.
 51. Смирнов С.А. Оценка интеллектуальной собственности. – М.: Финансы и статистика. 2003.- 352с., ил.
 52. Иванов М. Н., Шувалов С. А., Амосова Э. П. Экспериментальные исследования волнового редуктора для передачи вращения в герметизированное пространство // Изв. высш. учебн. заведений. Машиностроение. – 1970. - №12. – С. 42-52.
 53. Тарас Ф. С. Некоторые результаты испытаний герметичной волновой передачи // Волновые передачи. – М., 1970. – С. 49-53.
 54. Турьшев В. А., Василенко Н. В. Испытание волновой резьбовой передачи в вакууме // Машиностроение; Вып. 9- Красноярск, 1975.- Вып. 9 – С. 58-63.
 55. Медников М. И. Преимущества применения волновых вводов движения в вакуумном машиностроении // Тр.МИЭМ. Полупроводниковое электровакуумное машиностроение; Вып. 9. – М., 1970. – С.28-42.
 56. Медников М. И. Вводы движения в вакуум. – М.: Машиностроение, 1974. – 98с.
 57. Борисенко Г. А. Определение сопряженного осевого профиля гибкой гайки в волновой резьбовой передаче // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 6. – 1971. - №6. – С.
 58. Борисенко Г. А., Лагутин С. А. Применение резьбовой волновой передачи малых перемещений в точных механизмах // Тез. докл. республ. конф. – Ереван, 1976. – С.

59. Семенкин Е.Н., Семенкина О.Э., Терскев В.А. Методы оптимизации в управлении сложными системами.: Учебное пособие.- Красноярск.:Сибирский юридический институт МВД России., 2000г.-254с.
60. Борисенко Г. А. Исследование передач винт-гайка малых подач. – Дис. канд. техн. наук. / Мостанкин. – М., 1973, 155с.
61. Рябов В.Т. Взаимодействие материальных, энергетических и информационных потоков при функционировании технологического оборудования. Функции систем автоматического управления –В кн. Машиностроение. Энциклопедия (ред./совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т.III8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред Ю.В. Панфилова – 2000. – 744с., ил.
62. Ермаков Е.С. Этапы автоматизации электронного машиностроения.- В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред./совет : К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
63. Кузнецов М.Н. Системы автоматического управления дискретными технологическими установками и гибкими производственными линиями. – В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред/. совет : К.В. Фролов (пред.) и др. – М. : Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
64. Карцев Е.А. Датчики в системах управления технологическими процессами. – В кн. Машиностроение. Энциклопедия (ред/. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов,

- Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
65. Корнилов Р.В. Взаимосвязь Этапов развития технологий электронного машиностроения и систем автоматического управления технологическим оборудованием. – В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред./ совет: К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
66. КУЗНЕЦОВ м.н. Технические средства микропроцессорного управления. – В кн. – Машиностроение. Энциклопедия (ред./ совет : К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Т. III-8/ Ю.В. Панфилов, Л.К. Ковалев, В.А. Блохин и др.; Под общ. ред. Ю.В. Панфилова. – 200-0. – 744 с., ил.
67. Александрова А.Т. Новые способы передачи и формирования движения в вакууме. – М.: Высшая школа, 1979. – 79с., ил.
68. Ермаков Е.С. Роботы манипуляторы электронной техники. – М. Высшая школа, 1983. – 96 с., ил.
69. Юревич В.И. Теория автоматического управления. Л.: Энергия, 1975. – 416 с., ил.
70. Проников А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1978.- 592 с., ил.
71. Александрова А.Т. Исследование процессов дестабилизации параметров системы «механизм – контролируемая вакуумная среда» и разработка теоретических основ проектирования оптимальных механизмов. – Дисс., на сосиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МИЭМ, 1978 -483 с., ил.
72. Андреева Л.В. Упругие элементы приборов. – М.: Машиностроение, 1981. 392 с., ил.

73. Кобринский А.А. Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов : Основы устройств, элементы теории. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985, - 344 с., ил.
74. Юревич В.И. Основы робототехники: Учебник для вузов. – Л.: Машиностроение, ленингр. Отд-е, 1985. – 271 с., ил.
75. А.с. № 175795 СССР, М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая передача винт-гайка / Цейтлин Н.И., Косов М.Г., Руденко В.Н. – Оpubл. В Б. И. 22.01.1966.
76. Chironis N., Product Engineering. 31, № 6 (1960). См. также Вопросы ракетной техники, № 8, 1965.
77. Турышев В.А., Василенко Н.В. О некоторых областях использования волновой передачи винт-гайка // Тезисы докладов республиканской конференции. Новые достижения в области приборостроения. – Ереван, 1975. – С. 48.
78. Цейтлин Н. И., Цукерман Э.М. Новые тенденции проектирования волновых передач для применения в механизмах привода ракет и спутников // Вопр. ракетной техники. – 1965. № 2 – С. 51-63.
79. А. с. № 1147853 СССР, М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Регулируемый дисковый генератор волновой передачи./ Ю.П. Колесников, Н.В. Василенко, Б.К. Прокопенко. – Оpubл. в Б. И. 1985, № 12..
80. А. с. № 696226 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Регулируемый дисковый генератор волновой передачи. / В. А. Турышев, Н. В. Василенко, Я. Г. Елисеев, Ю. П. Колесников. – Оpubл. в Б. И. Открытия. Изобретения. Промышленные образцы, Товарные знаки. 1980, № 40.
81. А. с. № 756112 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Регулируемый дисковый генератор волновой передачи. / В. А. Турышев, Ю. П. Колесников, Н. В. Василенко, Я. Г. Елисеев. – Оpubл. в Б. И. Открытия, Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки. 1981, № 30.
82. А. с. № 229143 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая передача винт-гайка. / Синкевич Ю. Б., Тарас Ф. С. – Оpubл. в Б. И. 17.10.1968.

83. Цейтлин Н. И. Классификация волновых передач // Волновые передачи. – М., 1970. – С.3-12.
84. Masser C. W. Strain ware gearing linlor motion Пат. США, № 2543508 от 05.07.60, см. также Э.И.Д.М. № 21, реф. 175, 1961.
85. Цейтлин Н. И., Цукерман Э. М. Волновые передачи // Машиностроительные материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. – Том 4 (ВИНИТИ. Итоги науки и техники). – М., 1972. – 145с.
86. Турышев В. А., Василенко Н. В. Опытнo-промышленные волновые резьбовые вводы // Машиностроение; Вып. 9. – Красноярск, 1975. С.71-86.
87. Люкшин А. И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1982. – 223с.
88. Василенко Н. В., Колесников Ю. П., Елисеев Я. Г. Исследование регулируемых генераторов волновой герметичной передачи винт-гайка // Управление надежностью машин: Тез. докл. – Кировоград, 1978. – с.162.
89. Василенко Н. В., Колесников Ю. П., Турышев В. А. Разработка и исследование бесступенчатых регулируемых генераторов волновых герметичных передач // Сб. докл. НТК. Шестая всесоюзная научно-техническая конференция по управляемым и автоматическим приводам и передачам гибкой связью: Тез. докл. – Одесса, 1980. – 280.
90. Василенко Н. В., Колесников Ю. П., Усаков В. И. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на газопроницаемость гибких герметизирующих элементов волновых вводов высоковакуумных манипуляторов // Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов механической обработки на предприятиях Сибири и Дальнего Востока: Тез. докл. Всесоюзной НТК. – Иркутск, 1983. – С.24.
91. А. с. № 1163074 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая передача. / В. А. Турышев, Н. В. Василенко, Ю. П. Колесников, Я. Г. Елисеев, Н. А. Ковалев, М. И. Мединцев, В. А. Соколенко. – Оpubл. в Б. И. 1985, № 23.

92. А. с. № 664263 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Электропривод, /Василенко Н. В., Курилин А. П. – Оpubл. в Б. И. 1979, № 19.
93. А. с. № 843108 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Электропривод линейного и вращательного движения. / Н. В. Василенко, А. П. Курилин. – Оpubл. в Б. И. 1981, № 24.
94. Василенко Н. В., Курилин А. П. Комбинированные электроприводы с волновыми передачами – перспективное направление в области создания средств комплексной механизации и автоматизации производства // Перспективы развития ПТМ, средств комплексной механизации и автоматизации погрузочно-разгрузочных и транспортно-складских работ: Тез. докл. НТК. – Красноярск, 1980. – С.121-122.
95. А. с. № 727917 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая герметичная передача - муфта. / Турышев В. А., Василенко Н. В., Нестеренко В. В. – Оpubл. в Б. И. 1980, № 14.
96. А. с. № 787753 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновой линейный привод. /В. А. Турышев, Соловьев В. М., Цейтлин Н. И., Василенко Н. В.– Оpubл. в Б. И. 1980, № 46.
97. Создание и исследование запорной арматуры и герметичного привода штанги захвата с использованием волновой передачи: Отчет о научно-исследовательской работе / Краснояр. Политехн. ин-т; Н. В. Василенко, В. М. Соловьев, Ю. Н. Зубков, В. И. Усаков, В. В. Смелый, Ю. П. Колесников и др. Красноярск, 1983, № ГР. 80059986 ст. инв. № 0285.0004737 ДСП.
98. А. с. № 3502514 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Штанговый манипулятор. / А. А. Никитин, Н. В. Василенко. – Оpubл. в Б. И. 1983, № 20.
99. Василенко Н. В., Сильченко П. Н., Шаферштейн Э. И., Краузе Н. Э. Механизм выталкивания крана для разделывания слитков с волновой передачей. Перспективы развития подъемно-транспортного машиностроения, средств комплексной механизации и автоматизации погрузочно-

- разгрузочных и транспортно-складских работ // Тез. науч.-техн.конф. – Красноярск, 1980. – 25с.
100. Малогабаритный вакуумный манипулятор карусельного типа: Отчет о НИР (заключ.) / Краснояр. политехн. ин-т; Руководитель Н. В. Василенко. – Шифр темы №1 – Красноярск, 1983, № ГР 81037980, инв. № 70125, 220с. ДСП.
 101. А. с. № 696224 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Дисковый кулачок. / Турышев В. А., Колесников Ю. П., Василенко Н. В. – Оpubл. в Б. И. 1980, № 41.
 102. Волновые передачи в линейном приводе и приводе повышенной точности для работы в специальных условиях (вакууме): Отчет / Краснояр. политехн. ин-т. НИР (заключ.); руководитель Турышев В. А. № ГР 76077336. Красноярск, 1981, с. 152- В сб. НИР и ОКР от 19.02.81, БИ 917228.
 103. Турышев В. А., Василенко Н. В., Колесников Ю. П. Волновой ввод «винт-гайка» М 60х0,75: Информационный листок № 157-80. – Красноярск: Красноярский межотраслевой территориальный центр научно-технической информации и пропаганды, 1980.
 104. Лимаренко Г. Н., Василенко Н. В. Исследование некоторых характеристик волнового речного механизма // Вестник машиностроения. – 1984. – 13. – С. 29-31.
 105. А. с. № 1043392 СССР. М. Кл.⁴ F16 Н 57/00. Волновая речная передача с промежуточными звеньями в виде клиньев. / Г. Н. Лимаренко, В. А. Турышев, В. И. Сенькин, Н. В. Василенко, Е. В. Артюхов. – Оpubл. в Б. И. 16.05.80.
 106. Василенко Н. В., Ковалев Л. К. Механические системы вакуумного технологического оборудования для производства изделий квантовой электроники. Ч.2. Расчет и конструирование цельнометаллических вводов движения. – М., 1984. (сер.П. Лазерная техника и оптоэлектроника: Обзор по электронной технике).

107. Василенко Н.В., Соловьяк В.М. Волновые резьбовые передачи-приводы автоматизированных систем //Управляемые и автоматические приводы и передачи гибкой связью: Тезисы докл. VI Всесоюзной НТК. – Одесса, 1980.
108. Истомин С. Н., Борисов С. Г. Кинематическая погрешность резьбовой волновой передачи // Вестник машиностроения. – 1983. - № 12. – С. 20-23.
109. Masser C. W. The harmonic drive Enging materials and desing., № 4, 1964, p. 24.
110. Masser C. W. Патент США, № 2906143 от 29.09.1959. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 11, реферат 96.
111. Masser C. W. Патент США, № 2931248 от 05.04.1960. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 7, реферат 68.
112. Masser C. W. The harmonic drive. Mach Desing № 8, 1960. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 9, реферат 82.
113. Masser C. W., Carlsoon I. Патент США, № 2930254 от 29.03.60. См. также Э. И. серия Детали машин, 1961, № 13, реферат 117.
114. Masser C. W. Патент США, № 2983162 от 09.05.1961. См. также Э. И. серия Детали машин, 1962, № 11, реферат 75.
115. Цейтлин Н. И., Цукерман Э. М. Волновые передачи. Машиностроительные материалы, конструкции и расчёт деталей машин. Гидропривод. – М.: ВИНТИ, 1969. – 127с.
116. Mansfield D. L., Benford D.L. Harmonic Drive a Tarton in the Great Industrj, Semi-Annual Meeting of the American Gear Manufacturers Assosiation. Oktober, 1962, p.p.12-46.
117. Harmonic Drive. Mechanical Power Iransmission Sjstems. Internal Div. United Shol. Mach. Corp. Boston.
118. Павлов Б. И., Чернова Л. С. Волновые мелкомодульные зубчатые передачи и результаты их проверки на кинематическую тонкость. – Л., 1968.- С.45.

119. Чернова Л. С., Кащеев В. М., Чернов А. П. Исследование кинематической точности волновых редукторов при различных типах генераторов // Расчет, проектирование и контроль малогабаритных редукторов. – Л., 1968. – С. 110-115.
120. Шувалов С. А. Графоаналитический метод анализа геометрии зацепления в волновой зубчатой передаче // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1965. - № 2. – С. 21-28.
121. Чернова Л. С., Гинзбург Е. Г. О влиянии накопленных погрешностей окружного шага зубчатых колес на кинематическую точность двухволновой передачи при наличии многопарного зацепления. – Л., 1968. – 150 С.
122. Шамирян-Пахлеванян Р. И. Повышение точности зубчатого зацепления волновой передачи // Проектирование и технология изготовления деталей в точном приборостроении. – М., 1970. – С. 78-85.
123. Попов П. К. Исследование ошибок углового положения выходного вала волновой зубчатой передачи. – Дис. канд. техн. наук, / (МВТУ им. Н. Э. Баумана). – М., - 190 с.
124. Попов П. К., Шувалов С. А. и др. Частотный спектр кинематических ошибок зубчатых передач // Изв. ВУЗов Сер. Машиностроение. – 1972. - № 1. – С. 51-68.
125. Иванов М. Н. и др. Экспериментальное определение количества одновременно зацепляющихся зубьев в волновой зубчатой передаче. // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1968. - № 9. С.31-42.
126. Турышев В. А. Исследование волновых зубчатых передач с дисковым и кулачковым генераторами волн. – Дис. канд. техн. наук, / МИСИ. – М., 180 с.
127. Гинзбург Е. Г., Чернова Л. С. О влиянии погрешностей изготовления на кинематическую точность волновой передачи // Расчёт проектирование и контроль малогабаритных редукторов. – Л., 1970. – С.58-68.

128. Чернова Л. С. О влиянии формы кулачка генератора на многопарность зацепления в двухволновой передаче // Материалы 2-й научной технической конференции по волновым передачам. – Л., 1969. – С.59-67.
129. Чернова Л. С. Некоторые вопросы геометрии и кинематической точности одноступенчатых передач приборного назначения. – Дис. канд.техн.наук. КЛПИ – Л., 1969, 186 с., ДСП.
130. Шувалов С. А., Попов П. К., Финогенов В. А. Соотношение точности и жесткости волновых зубчатых передач // Волновые зубчатые передачи: Тез.докл. – Л., 1969. – С. 75-95.
131. Шамирян-Пахлеванян Р. И. Кинематическая точность волновых зубчатых передач. – Дис. канд. техн. наук, М., 1971, - 172 с.
132. Волков Д. П., Крайнев А. Ф. Планетарные и комбинированные передачи строительных и дорожных машин. – М.: Машиностроение, 1968. – 328 с.
133. Скворцова Г. А., Семин Ю. И., Комаров В. А. и Евдокимов А. П. Экспериментальное исследование мертвого хода волновой зубчатой передачи / Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1969. - № 10. – С.62-72.
134. Чернова Л. С., Гинзбург Е. Г. О мертвом ходе волновой зубчатой передачи // Волновые зубчатые передачи. – Л., 1969. – С. 108.
135. Комарова Т. Н., Крашенников В. И. Экспериментальное исследование мертвого хода и статистических моментов трогания волновой зубчатой передачи // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1971. № 2. – С.85-95.
136. Васильева И. И. Теоретическое и экспериментальное исследование точности приборных волновых зубчатых передач. – Дис. канд. техн. наук. / СЗПИ – Л., 1972. – 173 с.
137. Васильева И. И. О влиянии технологических погрешностей на мертвый ход волновых зубчатых передач // Труды СЗПИ. – Л., 1971. – С.58-68.
138. Нажесткин Б. П., Варламова Л. П., Морин И. С., Смирнов Н. И., Сабойнов А. А., Ходданян К. А. Стенд для испытания технических передач в ваку-

- уме при низких и повышенных температурах // Вестник машиностроения. – 1978. - № 3. – С. 25-27.
139. Смирнов Н. И. изнашивание зубчатых передач в вакууме // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1978. - № 8. – С. 51-54.
140. Нажесткин Б. П., Варламова Л. П., Смирнов Н. И. Исследование работоспособности зубчатых передач на воздухе и в вакууме // Изв. ВУЗов. Сер. – 1978. - № 2. – С. 38-41.
141. Нажесткин Б. П., Варламова Л. П., Макаров Ю. В., Смирнов Н. И. Особенности изнашивания зубьев цилиндрических зубчатых передач в вакууме // Вест. машиностроения. – 1978. - № 9. – С. 26-28.
142. Нажесткин Б. П., Леликов О. П., Смирнов Н. И. Исследование долговечности зубчатых передач в вакууме // Тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана. – 1980. - № 333. – С. 73-93.
143. Дроздов Ю. Н., Павлов В. Г. Трение и КПД зубчатых передач в вакууме // Вест. машиностроения. – 1970. - № 2. – С. 7-9.
144. Деримьян Г. П. Экспериментальное исследование КПД мелко модульных зубчатых электромеханизмов в вакууме // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение. – 1969. - № 11. – С. 71-74.
145. Амосова Э. П., Чижов В. Ф., Деулин Е. А., Попов Е. Н. Анализ исследования нагрузки на диски генератора волновой передачи в зависимости от параметров гибкого колеса и формы упругой линии // Машиностроение; Вып. 8. – Красноярск, 1975. – С. 21-28.
146. Усаков В. И., Василенко Н. В., Ковалев Л. К., Стадник В. Е., Колесников Ю. П. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на газоотделение и упрочнение поверхностных слоев гибких элементов герметичных волновых передач // Электронная техника. Сер. П. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1984. – Вып. 3 (17). – С.
147. Басу С. К. Шариковые винтовые пары // Станкоинструментальная промышленность. – 1960. - № 3. – С. 66-74.

148. Турпаев А. И. Сравнительный анализ шариковинтовых механизмов // Динамика машин и синтез механизмов. – М., 1974. – С. 187-204.
149. Левит Г. А., Борисенко Г. А. Расчет и конструирование передач винт-гайка качения: Руководящие материалы ЭНИМС. – М., 1964. – 81с.
150. Носатов С. П. Способы устранения люфтов // Резьбовой электромеханический привод. – Владимир, 1975. – С. 10-12.
151. Новоселов Б. В., Бушенин Д. В., Потапов Л. Д. Механическая передача в следящем приводе // Резьбовые несоосные и планетарные передачи в машиностроении и приборостроении. – Владимир, 1973. – С. 16-20.
152. Левина З. М., Решетов Д. М. Контактная жесткость машин. – М.: Машиностроение, 1971. – 210с.
153. Чижов В. Ф. Совместное деформирование растяжимого кольца и цилиндрической оболочки // Изв. ВУЗов. Сер. Машиностроение – 1969. - № 11. – С. 48-56.
154. Коротков В. П. Допуски на резьбовые соединения. Контроль резьбы. Приборостроение и средства автоматизации: Справочник. – Т.1. – М., 1963. – 260с.
155. Ионак В. Ф. Приборы кинематического контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 128с.
156. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти томах / Ред.совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – т. 6 Защита от вибраций и ударов / Под ред. К. В. Фролова. 1981. – 456 с., ил.
157. Ливитин Ф. Л. Справочник конструктора точного приборостроения.- М.: Машиностроение, 1964. – С.896.
158. Ливитин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584с.
159. Крагельский И. В., Любарский И. М., Гусяков А. А. и др. Трение и износ в вакууме. – М.: Машиностроение, 1973. – 216с.

160. Куцоконь В. А., Малошевский С. Г., Тимофеев Б. П. Применение теории вероятностей при проектировании механизмов приборов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 144с.
161. Спришевский А. И. Подшипники качения. – М.: Машиностроение. 1968. – 48с.
162. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576с.
163. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. - М.: Машиностроение, 1979. – 341с.
164. Турпаев А. И. Винтовые механизмы и передачи. – М.: Машиностроение, 1982. – 222с.
165. Единая система допусков и посадок СЭВ в машиностроении и приборостроении: Справочник. Т2. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 310с.
166. Вагин Н. С. Разработка герметичных волновых зубчатых передач для сверхвысоковакуумного технологического оборудования и повышения их надежности. – Дис. канд. техн. наук. / МВТУ им. Н. Э. Баумана. – М., 1984. – 227с.
167. Данечев М. Д. Фрикционные свойства тонких пленок дисульфида молибдена, полученных методом электровакуумного напыления. – М., 1972. – С. 49-55. (Экспресс-информация. Детали машин; Вып.29).
168. Иосилевич Г. Б. Концентрация напряжений и деформаций машин. – М.: Машиностроение, 1981, 223с.
169. Биргер И. А. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник, том 2. М.: Машиностроение, 1968. С.59.
170. Механизмы и устройства радиоэлектронной техники: Учебное пособие / Н.В. Василенко., И.Ю. Григорьев, Е.Н. Ивашов и др. – М.: МГИЭМ, 1994 – 250 с.
171. Расчет и конструирование механических систем оборудования аэрокосмической и электронной техники: Учебное пособие для вузов / Н.В. Василенко, Е.Н. Ивашов, Л.Н. Логинов и др.; Под ред. профессора Н.В.

- Василенко. – Красноярск: Красноярск. книж. изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1997.
172. Конструирование механических систем автоматики: Учебное пособие для вузов / Н.В. Василенко, Н.И. Галибей, Л.Н. Логинов, Г.Г. Назаров. – Красноярск: Красноярск. книж. изд-во; Сиб. аэрокосм. акад., 1997.
173. Механические системы вакуумно-космических роботов и манипуляторов: Учебное пособие для вузов / Н.В. Василенко, И.П. Бернацкий, Е.Н. Головенкин и др.; Под ред. профессоров Н.В. Василенко, К.Н. Явленского.: В 2 частях. – Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь». 1997.
174. Исследование влияния конструктивно-технологических факторов на газоотделение и упрочнение поверхностных слоев гибких элементов герметичных волновых передач / В.И. Усаков, Н.В. Василенко, Ю.П. Колесников и др. // Электронная техника. Сер. II, Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ / «Электроника», 1981. – Вып. 3 – д.с.п.
175. Александрова А.Т, Горюнов А.А., Ивашов Е.Н. и др. Разработка модулей промышленных роботов на основе l - координат, применительно к вакуумным условиям эксплуатации. – В сб. Промышленные роботы и манипуляторы для автоматизации и механизации производства.: Тезисы доклада научно-практического семинара: Владимир, 1983. – с. 64-69.
176. А.с. № 1283456 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/03. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, Л.Ф. Петров, И.Е. Трояновский – Оpubл. 15.01.87 //Б.И. № 2.
177. А.с. № 1298448 СССР, МКИ⁴ F 16 F 16/00, 7/10. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, В.П. Майборода, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 23.03.87 //Б.И. № 11.
178. А.с. № 1293406 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, Л.Ф. Петров, И.Е. Трояновский – Оpubл. 28.02.87 //Б.И. № 8.

179. А.с. № 1251026 № 1251026 СССР, МКИ⁴ G 105 В 13/00, G 05 G 19/00. Устройство управления динамической системой /Е.Н. Ивашов, И.Ю. Григорьев, М.И. Некрасов, С.В. Степанчиков – Оpubл. 15.08.86 //Б.И. № 30.
180. Курманалиев Т.И., Петров Л.Ф., Некрасов М.И., Ивашов Е.Н. Виброзащита объектов НКА. – В кн. Конструирование научных космических приборов. – М.: Наука, 1985. – с. 41-51, ил.
181. Ивашов Е.Н., Курчанова М.В. Плоские колебания исполнительных устройств промышленных роботов на *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР, Деп. рук. № 48 мш-86 Деп., 1986. – 20 с., ил.
182. Ивашов Е.Н., Курчанова М.В. Динамическая модель исполнительного устройства промышленного робота на *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР, Деп. рук. № 186-мш 86 Деп., 1986. – 23 с., ил.
183. А.с. № 1313686 СССР, МКИ⁴ В251/02, J 11/00. Манипулятор/ А.Т. Александрова, Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор и др. – Оpubл. 30.05.87 //Б.И. № 20.
184. А.с. № 1366389 СССР, МКИ⁴ В25 J 11/00. Механизмы для перемещения и ориентации деталей/ Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 15.01.88 //Б.И. № 2.
185. А.с. № 1335756 СССР, МКИ⁴ F 16 F Н1/00. Приводное устройство /Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, М.И. Некрасов, С.М. Оринчев. – Оpubл. 7.09.87 //Б.И. № 33.
186. А.с. № 1356375 СССР, МКИ⁴ В 25 J 11/00. Трансформируемая конструкция для фиксации положения объектов в пространстве /Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор, Т.И. Курманалиев и др., - 1.07.87 – ДСП.
187. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Исследование фрикционных характеристик твердосмазочных покрытий в вакууме. – В кн. Органические и полупроводниковые материалы. Пермь.: ПГУ, с. 175-181, ил.
188. А.с. № 1552537 СССР, МКИ⁴ В25 J 11/00. Трансформируемая конструкция для фиксации положения объектов относительно космического аппа-

- рата в пространстве /Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков., 22.11.89 – .
189. А.с. № 1356748 СССР, МКИ⁴ G 05 G 19/00. Устройство для определения положения тела в пространстве (его варианты) /А.Т. Александрова, А.А. Горюнов, Е.Н. Ивашов и др., 01.08.87 – ДСП.
190. Ивашов Е.Н., Курчанов М.В. Численное исследование динамики исполнительных устройств промышленных роботов в плоских *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР. Деп. рук. № 473 мш-86 Деп., 1986. № 13с., ил.
191. Ивашов Е.Н., Курчанов М.В. Численное исследование динамики исполнительных устройств промышленных роботов в пространственных *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР. Деп. рук. № 472 мш. 86, 1986. № 23с., ил.
192. Ивашов Е.Н., Курчанов М.В. Оценка погрешности позиционирования промышленных роботов в *l*-координатах. – М.: ВНИИТЭМР. Деп. рук. № 210 мш-87 Деп., 1987. – 10с., ил.
193. Ивашов Е.Н. Собственные изгибные колебания пневмоцилиндра промышленного робота, смоделированного в виде цилиндрической оболочки и стержня. – В кн. Автоматизированные станочные системы и роботизация производства. Тула: ТПИ, 187 – с. 125-135, ил.
194. Ивашов Е.Н. Геометрические зависимости в роботах на *l*-координатах. В кн. Безлюдные роторные и гибкие технологии. Тула: ТПИ. 1987. – с. 7-10, ил.
195. Карапетян С.С., Коростелин Ю.И. Адгезионная модель трения. – ДАН. – Машиноведение, № 6, 1980ю –с. 100÷105, ил.
196. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Юрашев В.В. Теоретическая оценка работоспособных функциональных механизмов перемещения. – В сб. Электронное машиностроение, робототехника, технология ЭВП. – М.: МИЭМ, 1985 – с. 95-100.

197. Асилин А.А. Метод оценки влияния окружающей среды на процессы внешнего трения и износа. – В сб Научные принципы и новые методы испытания материалов для узлов трения. – М.: Наука, 1968. - 23÷27 с.
198. А.с. № 1237414 СССР, МКИ⁴ В 25 J 11/00. *l*-координатный манипулятор /Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, М.И. Некрасов, И.В. Токарев – Оpubл. 15.06.86 //Б.И. № 22.
199. А.с. № 11278198 СССР, МКИ⁴ В25 J 1/02. Исполнительный орган манипулятора /Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, С.В. Степанчиков, Л.Ф. Петров – Оpubл. 23.12.86 //Б.И. № 47.
200. А.с. № 1315665 СССР, МКИ⁴ F 15 В 15/10. Устройство для передачи движения /Е.Н. Ивашов, В.П. Майборода, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 07.06.87 //Б.И. № 21.
201. Ивашов Е.Н., Курчанова М.В. Применение *l*-координатных манипуляторов. М.: ВНИИТЭР. Деп. рук. № 1071/19 мш-88. Деп. 1988. – 9 с., ил.
202. А.с. № 1495111 СССР, МКИ⁴ В 25 J 9/00, 11/00 *l*-координатный манипулятор /Е.Н. Ивашов, А.Ш. Колискор, М.И. Некрасов и др. – Оpubл. 23.07.89 //Б.И. № 27.
203. А.с. № 1574290 СССР, МКИ⁴ В 08 В 9/08 Система очистки емкостей /Г.К Антонова, Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др. – Оpubл. 30.06.90 //Б.И. № 24.
204. А.с. № 1620295 СССР, МКИ⁴ В 25 J 9/00, *l*-координатный манипулятор /И.Ю. Григорьев, Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др. – Оpubл. 15.01.91 //Б.И. № 2.
205. Ивашов Е.Н., Киреева Э.К., Курчанова М.В., Степанчиков С.В., Токарев И.В. Виброзащита машин и приборов с использованием *l*-координатных систем. – Тезисы доклада на 2-й Всесоюзной конференции по проблемам виброзащиты «Вибромаш-89»: Иркутск, 1989. – 0,2 с.
206. А.с. № 1600381 СССР, МКИ⁴ С 23 С 14/50, Устройство для транспортировки подложки в вакууме /И.Ю. Григорьев, Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др. – Оpubл. 15.06.90 //ДСП.

207. А.с. № 1639088 СССР, МКИ⁴ С 23 С 14/50, 14/24. Подложкодержатель / Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин, С.В. Степанчиков и др. – Оpubл. 01.12.90 //ДСП.
208. Ивашов Е.Н., Ляпин В.М., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Исполнительные устройства на основе *l*-координат для работы в условиях вакуума и чистых технологических средах. В кн. «Технология материалов и средства автоматизации в производстве изделий электронной техники. М.: 1989. с. 50-53.
209. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Пути создания устройства формирования движения в вакууме с учетом их влияния на изделия электронной техники. – В кн. Технология материалов и средства автоматизации в производстве изделий электронной техники. М.: 1989. – с. 78-81.
210. А.с. № 1469222 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00. Динамический гаситель колебаний /Г.К. Антонова. Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, Л.Ф. Петров, – Оpubл. 30.03.89 //Б.И. № 12.
211. А.с. № 1467286 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00., F 16 F 15/03. Гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов, В.П. Майборода, М.И. и др. – Оpubл. 23.03.89 //Б.И. № 11.
212. А.с. № 1553372 СССР, МКИ⁴ В 25 J 1/02, 9/12 Привод перемещения рабочего органа /Г.К. Антонова. Е.Н. Ивашов, М.И. Некрасов, С.В. Степанчиков, – Оpubл. 30.03.90 //Б.И. № 12.
213. А.с. № 1677391 СССР, МКИ⁴ F 16 С33/66. Узел трения для работы в экологически чистых средах /Г.К. Антонова. Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин и др., – Оpubл. 15.09.91 //Б.И. № 34.
214. А.с. № 1679729 СССР, МКИ⁴ F 15 В15/10. Инерциально-импульсное транспортное средство. / Е.Н. Ивашов, В.М. Курчанова, Е.Е. Мишина, И.В. Токарев. – Оpubл. 22.05.91 // ДСП.

215. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Проблемы вакуумной экологии в производстве изделий микроэлектроники. – Тезисы доклада на 3-ей НТК «Экология микроэлектроники – 90». М.: МИЭТ, 1990.
216. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Влияние вибраций вакуумного технологического оборудования на уровень привносимых загрязнений. – Тезисы доклада на 3-ей НТК «Экология микроэлектроники – 90». М.: МИЭТ, 1990.
217. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Методика расчета уровня загрязнений технологических объемов устройствами ввода и формирования движения. В кн. Обеспечение и контроль помещения и технологических сред в производстве изделий микро- и радиоэлектроники. М.: МИЭИ, 1989, - с. 65-72.
218. Ивашов Е.Н. Модели трения, изнашивания газовой выделенной для вакуумного машиностроения. Вестник машиностроения, № 12. – 1990. с. 17-20.
219. Ивашов Е.Н. *l*-координатные исполнительные устройства в оборудовании производства электронной техники //Автоматическое оборудование и технология производства изделий электронной техники. М.: МИЭМ, 1991, с. 3-12.
220. Ивашов Е.Н. Применение *l*-координатных исполнительных устройств в напылительном оборудовании //Автоматическое оборудование и технология производства изделий из электронной техники. М.: МИЭТ, 1991, с. 33-37.
221. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Инженерная методика расчета механических устройств микроэлектроники на привносимый уровень загрязнений. – Сборник докладов 4-й НТК СНГ и зарубежных стран «Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях». М.: МИЭТ, 1992. – с. 121-127.
222. Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В., Токарев И.В. Четырехуровневая система виброзащиты объектов микроэлектроники. – Сборник докладов 4-й НТК

- СНГ и зарубежных стран «Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях». М.: МИЭТ, 1992. – с. 150-154.
223. Ивашов Е.Н., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. Вакуумная технологическая экология в производстве изделий микроэлектроники. – Сб. докладов 4-й НТК СНГ и зарубежных стран «Достижения и перспективы технологической экологии микроэлектроники в чистых производственных помещениях». М.: МИЭТ, 1992. – с. 188-193.
224. А.с. № 1691091 СССР, МКИ⁴ В 25 J 9/00. l-координатный манипулятор /Е.Н. Ивашов. – Оpubл. 15.11.97 //Б.И. № 42.
225. А.с. № 1716214 СССР, МКИ⁴ F 16 F 15/00. Динамический гаситель колебаний /Е.Н. Ивашов – Оpubл. 31.03.92 //Б.И. № 8.
226. А.с. № 1733907, МКИ⁴ G 01 В 5/03. Механизмы перемещения /Н.В. Василенко, Е.Н. Ивашов, М.А. Куликов, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков – Оpubл. 15.05.92 //Б.И. № 18.
227. А.с. № 1713065 СССР, МКИ⁵ Н 02 № 2/00. Устройство для прецизионного перемещения изделий /Л.Л. Андреева, Г.К. Антонова, Н.В. Василенко, Е.Н. Ивашов, С.В. Степанчиков. – Оpubл. 15.02.92 //Б.И. № 6.
228. А.с. № 1716822 СССР, МКИ⁵ С23 С 14/56. Устройство для очистки вакуумной камеры / Е.Н. Ивашов, В.М. Ляпин, М.И. Некрасов, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков. – ДСП, 1992.
229. Ивашов Е.Н., Ляпин В.М., Некрасов М.И., Степанчиков С.В. методика проектного и поверочного расчетов шарикоподшипников, предназначенных для работы в сверхвакуумном автоматизированном оборудовании. – В кн. Автоматизированные станочные системы и роботизация производства. Тула, ТПИ.: 1992. – с. 64-70.
230. А.с. № 1649194 СССР, МКИ⁴ Н57/04 Герметичная волновая зубчатая передача /Г.К. Антонова, Н.О. Голованова, Е.Н. Ивашов, С.В. Комаров, С.В. Степанчиков. – Оpubл. 15.05.91 //Б.И. №18.

231. А.с. № 1684557 СССР, МКИ⁴ F 16 F 5/00. Поглотитель ударов /Л.Л. Андреева, Е.Н. Ивашов, Н.В. Копнева, С.М. Оринчев, С.В. Степанчиков. – Оpubл. 15.10.91 // Б.И, № 38.
232. Коготков В. П., Тайц Б. А. Основы метрологии и теории точности измерительных устройств. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 352с., ил.
233. Борисов С. Г., Истомина С. Н., Некрасов М. И. Экспериментальная установка для исследования кинематической точности устройств преобразования движения в высоком вакууме. – М.: Вестник машиностроения, №9, 1982. – с.17-22, ил.
234. Куцоконь В. А. Точность кинематических цепей приборов. – Л.: Машиностроение, 1980. – 221с., ил.
235. Первицкий Ю. Д. Расчет и конструирование точных механизмов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 455с., ил.
236. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Расчет интенсивности износа элементов подшипников скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 749 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.
237. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. К вопросу об определении момента трения в подшипнике скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 748 ап – Д82, 1982. – 4с., ил.
238. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Расчет коэффициента трения в подшипнике скольжения при сухом трении. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 899 ап – Д83, 1983. – 5с., ил.
239. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Расчет интенсивности износа в подшипнике скольжения при сухом трении. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 900 ап – Д83, 1983. – 5с., ил.
240. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Адгезионная модель трения металлических материалов подшипников скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 824 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.

241. Ивашов Е. Н., Папцов Г. М., Ганн К. Г. Напряжения и деформации в подшипниках скольжения и их влияние на трение и износ металлополимерных пар. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 721 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.
242. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Адгезионная модель трения разноименных металлических материалов подшипников скольжения. – М.: НИИавтопром. Деп. Рук. № 825 ап – Д82, 1982. – 5с., ил.
243. Ган К. Г., Ивашов Е. Н. Характер износа фторонаполненных материалов и явления, сопровождающие его в вакууме. – М.: ЦНИИИЭлектроника. Деп. рук. № 8026/82, 1982. – 6с., ил.
244. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Исследование кинематики зацепления волновых передач с планетарным генератором волн. – М.: ЦНИИЭлектроника. Деп.рук. № 8028/82, 1982. – 6с., ил.
245. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Исследование напряженно-деформированного состояния гибких цилиндрических элементов волновых вводов. – М.: ЦНИИЭлектроника. Деп.рук. № 8530/83, 1983. – 9 с., ил.
246. Ивашов Е. Н., Некрасов М. И. Долговечность радиальных однорядных шарикоподшипников при осевой нагрузке. – М.: ЦНИИЭлектроника. Деп.рук. № 8023/82, 1982. – 7 с., ил.
247. Ивашов Е. Н., Мельников А. И., Некрасов М. И. Определение интенсивности изнашивания зубьев волновых зубчатых передач. – М.: ВНИИТЭМР. Деп.рук. № 135, мш-85 Деп., 1985. – 6с., ил.
248. Хант К.Х. Кинематические структуры манипуляторов с параллельным приводом. – Конструирование и технология машиностроения, 1983, №4, с. 201-210.
249. Денисов А.Г., Кузнецов Н.А., Макаренко В.А. Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии: Обзоры по электронной технике: Сер. 7. Тех-

- нология, организация производства и оборудования. – М.: ЦНИИ Электроника, 1981, вып. 17 (828). – 52 с., ил.
250. Денисов А.Г., Садофьев Ю.Г., Сеничкин А.П., Молекулярно-лучевая эпитаксия (приборная реализация): Обзоры по электронной технике: Сер. 7. Технология, организация производства и оборудования. – М.: ЦНИИ Электроника, 1981, вып. 17 (828). – 52 с., ил.
251. Василенко Н.В., Ковалев Л.К. Механические системы вакуумного технологического оборудования для производства изделий квантовой электроники. Часть 1. Вакуумное оборудование, механизмы ввода и формирования движения: Обзоры по электронной технике: Сер. 2 Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ Электроника, 1983, вып. 4 (978), - 62 с., ил.
252. Ковалев Л.К. Вакуумное оборудование для производства токопленочных структур квантовой электроники.: Обзоры электронной техники: Сер. 2 Лазерная техника и оптоэлектроника. – М.: ЦНИИ Электроника, 1982, вып. 4 (886), - 83 с., ил.
253. Майборода В.П., Арутюнян Н.Х., Трояновский И.Е. Динамика и динамическая устойчивость неоднородных вязкоупругих систем. – В сб. трудов Всесоюзного симпозиума по устойчивости. – Калинин.: КПИ, 1982, -с. 102-106, ил.
254. Katsaitic Spiros. Gedampfte Zwangsscingungen von isound orthotropen Polygonplatten «Fortschr. Ber/VEDIZ», 1978, R 11, №28, s. 26.
255. Warburton G.B/ Optimumabsorber parameters for minimizing vibration response «Earth-quake Eng. And struct. Dyn». 1981, 9, №3, p. 252-262.
256. Кузнецов М.М. Волчкевич Л.И., Замчалов Ю.П. Автоматизация производственных процессов. – М.: Высшая школа, 1976. – 431 с., ил.
257. Некрасов М.И. Направления создания надежных механизмов и устройств формирования и преобразования движения в высоком и

- сверхвысоком вакууме. – М.: ЦНИИ Электроника. Деп. Рук. № Р3432, 1983. – 20 с., ил.
258. Hunt К.Н. Kinematic geometry of mechanisms. London . Oxford University Press. 1978, p. 426-428.
259. Волчкевич Л.И. Автоматизация производственных процессов. М.: Машиностроение, 2007.
260. Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials. 1st ed. / ed. Kasap S., Capper P. Springer, 2006. P. 263.
261. Pfitzner L. 450 mm Manufacturing - Synergies and Benefits for Smaller Diameters [Электронный ресурс]?: презентация. Fraunhofer IISB, 2011.
262. Zheng Lu, Kimbel S. Growth of 450mm diameter semiconductor grade silicon crystals // Journal of Crystal Growth. 2011. Vol. 318. P. 193–195.
263. Chen-Fu Chien et al. Economic analysis of 450mm wafer migration // Proceedings of the International Symposium on Semiconductor Manufacturing, ISSM 2007. 2007. P. 1–4.
264. <http://www.giredmet.ru/>.
265. Б.А. Шагаров, Н.А. Терехин, Панов П.И. Технологические особенности выращивания МКК на установке «Кедр» (производство «Красмаш») // Сборник тезисов конференции «Кремний 2004». Иркутск: Изд. Института географии СО РАН, 2004. P. 86.
266. Жвирблянский В.Ю. Ростовое оборудование и требования, предъявляемые к нему // Тезисы докладов I-го Международного практического семинара «Оборудование и технологии роста кристаллов – 2009». Брянск: НИИ «Изотерм», 2009.
267. <http://nii-izoterm.ru>.
268. <http://www.pvatepla.com/>.
269. Czochralski-Puller EKZ 3500 for the mass production of silicon crystals up to 300 mm diameter [Электронный ресурс]: проспект. PVA TePla AG, 2013.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Этой монографией завершается серия книг «Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении». В серии были рассмотрены наиболее важные научные и прикладные вопросы развития микро- и наноинженерии в электронном машиностроении, в том числе: наноинженерия туннельных преобразователей, наноинженерия углеродных структур, фуллеренов и нанотрубок, микроинженерия коммутационной аппаратуры, пьезоэлектрических приводов. Также были рассмотрены актуальные проблемы построения современного роторного оборудования, предназначенного для производства монокристаллического кремния. В процессе работы над книгами было решено не рассматривать вопросы микро- и наноинженерии электронно-лучевой оптики в рамках данной серии. Авторы планируют вернуться к этой тематике отдельно.

Авторы серии монографий выражают глубокую благодарность рецензентам: д.т.н. и д.ф.н., проф., заведующему лабораторией Учреждения Российской академии наук Институт машиноведения имени А.А.Благонравова РАН В.А. Глазунову и д.т.н., проф., генеральному директору ООО «CALS-Технологии» А.С. Шалумову за тщательный просмотр рукописей, проявленное внимание к рецензируемым работам, а также за высказанные ценные замечания, которые способствовали улучшению содержания предлагаемых читателю изданий. Хотелось бы поблагодарить к.т.н. М.В. Реутову, к.т.н. О.В. Земскова, к.т.н. А.Ю. Павлова, д.т.н., проф. Н.В. Василенко, к.т.н. Н.А. Терехина, к.т.н. П.И. Панова и к.т.н. В.К. Гупалова за помощь в подготовке монографий данной серии. Отдельное спасибо художникам Е.И. Сверчковой и Н.Г. Фатьяновой за оформление обложек.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	том	стр.
ВВЕДЕНИЕ	1	3
ГЛАВА 1. ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АГРЕГАТОВ И МОДУЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	1	5
1.1. Кристаллизационные процессы выращивания монокристаллического кремния и их механическое обеспе- чение	1	5
1.2. Агрегаты и модули оборудования для выращивания монокристаллического кремния методом Чохральского	1	13
1.3. Сравнительные исследования волновых резьбовых передач модулей оборудования для выращивания монокри- сталлического кремния	1	32
1.4. Особенности тепловых модулей оборудования для выращивания монокристаллического кремния	1	49
1.5. Модули управления процессом выращивания монокристаллического кремния	1	56
1.6. Методы оптимизации технологического процесса выращивания монокристаллического кремния	1	60
ГЛАВА 2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	1	69
2.1. Параметры состояния системы расплав-кристалл	1	69
2.2. Зарождение и рост монокристаллов кремния	1	77
2.3. Влияние условий выращивания на качество монокристаллического кремния	1	83
ГЛАВА 3. ВОЛНОВЫЕ МОДУЛИ ДЛЯ ОБОРУДОВАНИЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ	1	106

3.1. Общие сведения о волновых зубчатых передачах.....	1	106
3.2. Волновые зубчатые передачи ростового оборудования.	1	112
3.3. Исследование высокоточных модулей перемещения слитков монокристаллического кремния на базе волновых резьбовых передач и вводов.....	1	122
3.4. Аналитические выражения составляющих погрешностей положения ведомого звена волновой резьбовой передачи.....	1	133
ГЛАВА 4. МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИВНОСИМОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ОТ МОДУЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБЪЕМЕ РОСТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	2	3
4.1. Энергетический баланс в зоне трения модулей перемещения ростового оборудования.....	2	3
4.2. Модели трения и износа в условиях технологических вибраций.....	2	20
4.3. Расчет элементов модулей перемещения на привноси- мый уровень загрязнений в технологический агрегат.....	2	34
4.4. Примеры расчета на привносимый уровень загрязнений для модулей перемещения типа винт-гайка.....	2	39
ГЛАВА 5. ВИБРОЗАЩИТНЫЕ МОДУЛИ РОСТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	2	49
5.1. Виброзащитные модули ростового оборудования с од- ной степенью свободы.....	2	50
5.2. Математическая модель виброзащитного модуля ростового оборудования на шесть степеней свободы.....	2	55
5.3. Анализ расчетов многостепенных виброзащитных модулей на ЭВМ.....	2	71
ГЛАВА 6. ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОМ ОБОРУДОВАНИИ.....	2	98

6.1. Обобщенный критерий оценки качества изготовления монокристаллического кремния.....	2	98
6.2. Автоматизированные установки для выращивания монокристаллического кремния по методу Чохральского..	2	101
ГЛАВА 7. ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МОДУЛЕЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	2	129
7.1. Четырехуровневая структурная схема объекта проектирования.....	2	129
7.2. Математические модели объекта проектирования.....	2	133
7.3. Имитационное моделирование модулей ростового оборудования.....	2	144
7.4. Морфологический анализ в организации поиска технических решений модулей ростового оборудования.....	2	151
7.5. Методика выбора оптимального варианта технического решения модуля ростовой установки.....	2	158
7.6. Требования к стоимости научно-технической продукции.....	2	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	2	185
ЛИТЕРАТУРА.....	1, 2	162,187
ПОСЛЕСЛОВИЕ.....	2	216
ОГЛАВЛЕНИЕ	1, 2	191,217

Для заметок

Для заметок

Для заметок

Научное издание

МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИЯ В ЭЛЕКТРОННОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

СЕРИЯ ИЗ 7-И МОНОГРАФИЙ

Монография 7 Том II

АНДРИАНОВ Константин Николаевич
БАЛАН Никита Николаевич
ВАСИН Владимир Анатольевич
ИВАШОВ Евгений Николаевич
СТЕПАНЧИКОВ Сергей Валентинович

МИКРОИНЖЕНЕРИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Редактор **П. С. Костомаров**

Технический редактор **П. С. Кузнецов**

Рисунок на обложке выполнен художником **Е.И. Сверчковой**

Подписано в печать 18.06.2013. Формат 60x84/16.

Бумага типографская. Печать – ризография.

Усл. печ. л. 11,5. Уч.-изд. л. 11,8. Тираж 300 экз.

Заказ Изд. № 3

Издательство НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.

Отпечатано в ГНУ «НИИ ПМТ»
113054 Москва, ул. М. Пионерская, 12.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ МОНОГРАФИИ

АНДРИАНОВ Константин Николаевич, к.э.н., доцент.
профессор кафедры менеджмента МИДПО Российской
академии народного хозяйства и государственной службы
при Президенте РФ,

БАЛАН Никита Николаевич, к.т.н.
Главный специалист ФГУП «ВО «Внештехника»

ВАСИН Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент.
Доцент кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и
нанотехнологии» МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского

ИВАШОВ Евгений Николаевич, д.т.н., профессор.
Профессор кафедры «Электроника и наноэлектроника»
МИЭМ НИУ ВШЭ

СТЕПАНЧИКОВ Сергей Валентинович, к.т.н., доцент,
старший научный сотрудник.
Доцент кафедры «Электроника и наноэлектроника»
МИЭМ НИУ ВШЭ

ISBN 978-5-905872-15-0



9 785905 872150