

на правах рукописи

Кондратьева Наталья Александровна

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ  
ВИБРОЗАЩИТНОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ, УСТАНОВЛИВАЕМОЙ НА ПОДВИЖНЫХ  
ОБЪЕКТАХ.

05.13.16 - Применение вычислительной техники, математического  
моделирования и математических методов в научных  
исследованиях.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Запорожье - 1994



00777062 (Т)

2 -

Робота виконана в Запорізькому державному університеті

- Научний керівитель - кандидат технічних наук,  
Брахко А.И.
- Офіційні опоненти: - доктор фізико-математических наук,  
професор Перелелица В.А.  
- доктор технічних наук,  
професор Ройтман А.Б.
- Ведуче підприємство - Запорізький науково-дослідницький  
інститут радіосвязи.

Захита дисертації состоится 27. октябрь 1994г. в 15<sup>00</sup>  
в засіданні спеціалізованого комітету К 068.52.02 при Запо-  
різькому державному університеті по адресу: 330600, г. За-  
поріжжя, ул. Жуковського, 66, ауд. 50

С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Запорізького  
дослідницького університету.

Автореферат розослан 27. сентябрь 1994г.

Учений секретар  
спеціалізованого комітету  
К.Т.Н., доцент

Сисюв Н.А.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

АВ - 51.002

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современный этап научно-технической революции характерен: интенсивным ростом удельных мощностей явшки, рабочих частот роторов, силовых и вспомогательных механизмов, от-носительным уменьшением масс и жесткостей, повышенными требованиями к надежности и срокам службы, а также к устойчивости систем управления.

В области электронного аппаратостроения в связи с мини и микроминиатюризацией наблюдается уменьшение масс, ослабление жесткостей корпусов, блоков, рам и стоек.

Широкий класс подвижных объектов, как источников внешних га-занических воздействий, обладает существенно различными по форме и интенсивности динамическими воздействиями, как в пределах нег тустеювки на конкретном подвижном объекте (ПО), так и в пределах класса ПО.

Поэтому проектирование виброзащитных систем (ВЗС) носит инди-видуальный характер.

Цель диссертационной работы. Разработка эффективного вариан-та методики системного подхода к проектированию ВЗС радиоэлектром-ной аппаратуры (РЭА), устанавливаемой на ПО.

Научная новизна. Предложена методика синтеза ВЗС РЭА опти-мальной по многим критериям качества.

Предложенный подход развит на основе поиска оптимума исконых показателей качества по данным численного эксперимента на цифро-вой имитационной модели системы.

Разработаны алгоритмы и реализующие их пакеты прикладных про-грамм для решения задач настройки и переналадки ВЗС на объектах установки. Выполнено численное исследование сходимости предложе-нных алгоритмов.

Достоверность основных научных результатов подтверждается

согласованностью теоретических предпосылок с данными стендовых и натурных испытаний с данными проектных расчетов на цифровой модели ВЭС.

Научная и практическая ценность заключается в разработке методики проектирования ВЭС оптимальной по многим критериям качества.

Разработана и предложена методика быстрой переналадки ВЭС при смене места установки на объекте и в случае смены самого объекта установки.

Предложенные методики расчета ВЭС реализованы в пакетах программы для АРМ в составе САПР РЗА в АРМТ, на ПЭВМ, что позволяет автоматизировать основные процессы проектирования и переналадки ВЭС в процессе эксплуатации, тем самым повышая надежность и качество РЗА.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы обсуждались и докладывались на: научном семинаре кафедры конструирования и производства РЗА ЗМН, научном семинаре кафедры конструирования и производства РЗА МЭИ, научном семинаре кафедры прикладной математики ЗГУ, научной конференции в ЗГУ, научно-технической конференции по проблемам АСОНИКА /Севастопольский ДНТП 1989г./ . Осуществлено промышленное внедрение предложенной методики.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 работы в которых отражено основное содержание работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из: введения, трех глав, заключения, приложений и списка литературы, содержит 148 страниц машинописного текста, 19 иллюстраций, 6 таблиц, библиографический список из 73 наименований, 7 приложений.

#### Содержание работы.

Во введении выполнен краткий обзор работ по применению методов оптимизации параметров ВЭС РЗА по многим показателям качества и ряду ограничений. Отмечена целесообразность применения численного

эксперимента на стадии предпроектных и проектных исследований при разработке ВЭС РЭА в системе автоматизированного проектирования. Сформулирована цель работы, отмечены положения выносимые на задание.

Первая глава содержит краткий аналитический обзор теории и практики синтеза ВЭС РЭА, разбиваемой на ПО. Приводится математический аппарат выбранный для анализа механических воздействий на заданную РЭА, оценивается влияние механических воздействий на элементы аппаратуры, ее устойчивость и качество. Рассматривается процесс выбора и составления расчетной модели, производится выбор эффективного и экономного математического аппарата реализации расчетной модели (РМ). Так как синтез ВЭС выполняется для вновь проектируемой РЭА - показана целесообразность поиска оптимальных параметров на цифровой модели (ЦМ).

Рассмотрены основные этапы моделирования с выделением основного объекта исследования - виброзащитной системы.

1. Элементы расчетной модели и их характеристика.

1.1. Источники возмущений /кратко ИСТОЧНИК = И/.

1.2. Объект защиты /ОБЪЕКТ = О/.

1.3. Виброизолирующее устройство /ВУ/.

1.4. Объект исследования О, относим к классу твердых тел.

1.5. Расчетная схема системы будет иметь вид, показанный

на рис. 1.1.

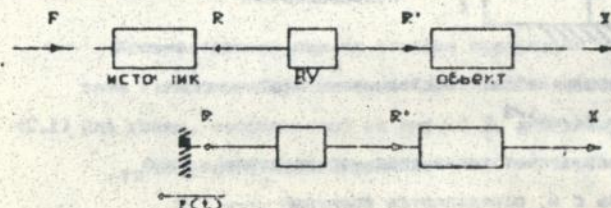


Рис. 1.1. Принципиальная схема ВЭС:

а - общий случай, б - кинематическое возбуждение  $\xi = \xi(\xi)$ ,

$F, F(\xi)$  - приложения к системе внешние возмущения.

$R, R'$  - внутренние силы, возникающие в ВУ;  $x$  - угол ВУ, направление действия внутренних сил системы;  $\xi = \xi(t)$  - заданный закон движения источника.

В простейшем случае рассматривается безинерционный одноосный виброизолятор, (ВИ) в этом случае  $R=R'$ , при этом реакции  $R$  и  $R'$  пропорциональны деформации  $\delta$  и скорости деформации ВИ, тогда

$$R = c\delta + b\dot{\delta} \quad (1.1)$$

описывает линейную характеристику простого безинерционного виброизолятора. Коэффициенты  $c$  и  $b$ , соответственно коэффициенты жесткости демпфирования. Подоль ВИ со свойствами (1.1) можно представить физически в виде параллельного соединения пружины и демпфера (рис. 1.2).

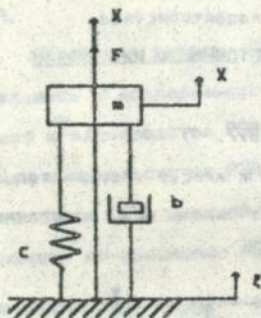


Рис. 1.2. Расчетная модель простейшей ВЗС с одной степенью свободы;  $m$  - масса несомого тела;  $x$  - координата несомого тела;  $F$  - сила приложенная к несомому телу;  $z$  - координата основания;  $c$  - коэффициент жесткости ВИ;  $b$  - коэффициенту демпфирования ВИ.

Из (1.1) определяется: собственная частота системы

$$\omega_0 = (c/m)^{1/2} \quad (1.2)$$

Здесь  $c$  определяет также статическую деформацию  $\delta_{ст}$  (осадку), связь с  $\omega_0$  определяется формулой

$$\omega_0 = \left( \frac{g \sin \alpha}{\delta_{ст}} \right)^{1/2} \quad (1.2.1)$$

где  $\delta_{ст}$  - статическая деформация под осевой статической нагрузкой  $mg \sin \alpha$ ;  $m$  - масса несомого тела;  $\alpha$  - угол наклона оси ВИ к горизонту. ВЗС, представленная на рис. 1.2, характеризуется коэффициентом

демпфирования

$$n = b/\sqrt{2m} \quad (1.2.2)$$

и относительным демпфированием

$$v = n/\omega_0 = b/\sqrt{2\zeta_0 m} \quad (1.2.3)$$

При  $v = 1$  в системе реализуется критическое демпфирование.

### Эффективность виброзащиты

Коэффициенты эффективности при гармоническом возбуждении.

Рассматриваются кинематические возбуждения. Для системы показанной на рис. 1.1 имеем:

$$F(s) = 0, \quad \xi(s) = \xi_0 \sin \omega t, \quad (1.3)$$

Цель защиты заключается в уменьшении амплитуды абсолютного ускорения /перегрузки/ объекта

$$W = \frac{\xi_0 \omega^2 (\omega_0^2 - 4n^2 \omega^2)^{1/2}}{((\omega_0^2 - \omega^2) + 4n^2 \omega^2)^{1/2}}, \quad (1.4)$$

а так же в уменьшении амплитуды его колебаний относительно основания:

$$X'_0 = \frac{\xi_0 \omega^2}{((\omega_0^2 - \omega^2) + 4n^2 \omega^2)^{1/2}}. \quad (1.5)$$

Количественная оценка степени реализации цели виброзащиты оцениваем с помощью безразмерных (критериев) коэффициентов эффективности.

Для схемы, изображенной на рис. 1.2, для кинематического возбуждения:

коэффициент виброизоляции

$$K_R = \frac{W}{\xi_0 \omega^2}, \quad (1.6)$$

Коэффициент динамичности

$$K_X = \frac{X'_0}{\xi_0 \omega^2}. \quad (1.7)$$

Зависимость  $K_R$ ,  $K_X$  и  $K_{X'}$  от безразмерных параметров

$$z = \frac{v}{\omega_0}; \quad v = \frac{n}{\omega_0} = \frac{b}{\sqrt{2}} \zeta_0 \omega_0^{1/2}$$

имеет вид:

$$K_R = \left( \frac{1 + 4\nu^2 z^2}{(1 - z^2)^2 + 4\nu^2 z^2} \right)^{1/2}; \quad (1.8)$$

$$K_X = \frac{1}{((1 - z^2)^2 + 4\nu^2 z^2)^{1/2}}; \quad (1.9)$$

$$K_{X'} = \frac{z^2}{((1 - z^2)^2 + 4\nu^2 z^2)^{1/2}}. \quad (1.10)$$

Условья эффективности виброзащиты по критериям  $K_R$ ,  $K_X$ ,  $K_{X'}$ .

Сформулируем критерии  $K_R$ ,  $K_X$ ,  $K_{X'}$  в виде неравенств

$$K_R \leq 1; K_X \leq 1; K_{X'} \leq 1. \quad (1.11)$$

Заметим, что все критерии зависят от частоты, можем говорить об эффективности виброзащиты на данной частоте  $Z$  или в диапазоне частот  $Z_1 \leq Z \leq Z_2$ .

Анализ выражений (1.11) показывает, что:

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

$$Z \geq \sqrt{2}. \quad (1.12)$$

при этом при любом  $Z \geq \sqrt{2}$  эффективность тем выше, чем слабее демпфирование; в пределе наилучшей эффективностью обладает идеально упругая ВМ ( $\nu=0$ ).

2. Эффективность виброзащиты по критерию  $K_X \leq 1$  также обеспечена в диапазоне (1.12) при любых значениях  $\nu$ .

При  $\nu = 1/\sqrt{2}$  виброзащита эффективна во всем диапазоне частот  $0 < Z < \infty$ ; при  $\nu < 1/\sqrt{2}$  эффективность имеет место в диапазоне

$$Z > z(1 - 2\nu^2)^{1/2}. \quad (1.13)$$

При фиксированной величине  $Z$  эффективность растет с ростом демпфирования.

3. Виброзащита по критерию  $K_{X'} \leq 1$  эффективна во всем частотном диапазоне, если  $\nu > 1/\sqrt{2}$ , а при  $\nu < 1/\sqrt{2}$  в диапазоне

$$0 < Z < (1/\sqrt{2(1-2\nu^2)})^{1/2} \quad (1.14)$$

Степень эффективности на фиксированной частоте  $Z$  повышается с ростом демпфирования; в крайнем случае (при  $\nu=0$ ) диапазон сужается до полосы

$$0 < Z < 1/\sqrt{2} \quad (1.15)$$

Зависимости  $K_R = K_R(Z, \omega)$ ,  $K_X = K_X(Z, \omega)$ ,  $K_{X'} = K_{X'}(Z, \omega)$  при фиксированных  $\nu$  показаны на рис. 1.3 - 1.5.

Эти зависимости можно рассматривать как амплитудно-частотные характеристики системы по соответствующему входу и выводу. Тогда фазо-частотные характеристики ВЭС, имеют значения

$$\theta = \arctg \frac{2\nu Z}{1-Z^2} \quad (1.16)$$

$$\eta = \arctg \frac{2\nu Z^2}{1-Z^2(1-4\nu^2)} \quad (1.17)$$

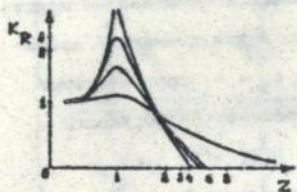


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента виброизоляции  $K_R$  от расстройки  $Z$

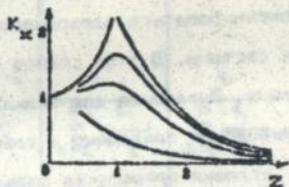


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента эффективности (динамичности)  $K_X$  от расстройки  $Z$

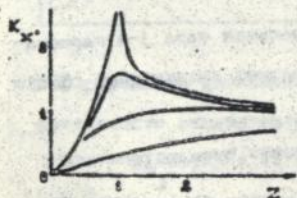


Рис. 1.5. Зависимость коэффициента эффективности  $K_{X'}$  от расстройки  $Z$

Они представляют фазовые сдвиги процессов соответствующих  $X(t)$ ,  $X'(t)$  (1.16) и  $X''(t)$ ,  $X'''(t)$  (1.17) относительно возмущающей  $F(t)$  и  $\omega(t)$ .

Связь коэффициентов  $K_R$ ,  $K_X$ ,  $K_X'$ , а также фазовых сдвигов  $\sigma$ ,  $\eta$  с амплитудами и фазами процессов  $X(t)$ ,  $X'(t)$ ,  $R(t)$  и их производных по времени показано в табл. 1.

Установившиеся колебательные процессы в ВЭС при кинематическом возбуждении

Таблица 1

Параметр	$X(t)$	$X'(t)$	$R(t)$
$X(t)$	$\xi_0 K_R \sin(\omega t - \eta)$	$\xi_0 K_X \sin(\omega t - \sigma)$	$m \xi_0 \omega^2 K_R \sin(\omega t - \eta + \pi)$
$\frac{d^n}{dt^n} X(t)$	$\xi_0 \omega^n K_R \sin(\omega t - \eta + n(\pi/2))$	$\xi_0 \omega^n K_X \sin(\omega t - \sigma + n(\pi/2))$	$m \xi_0 \omega^{n+2} K_R \sin(\omega t - \eta + (n+2)(\pi/2))$

Эквивалентные коэффициенты жесткости и демпфирования.

Как правило ВИ устройство выполняется в виде соединения нескольких виброизоляторов, образующих сложный виброизолятор.

При некоторых условиях реакция  $R$  такого ВИ соединения может аппроксимироваться зависимостью (1.1), где  $\delta$  уже суммарная деформация системы. В этом случае коэффициенты  $c_3$  и  $b_3$  соответствуют простому. Выражения для эквивалентных коэффициентов жесткости и демпфирования приведены в табл. 2.

Условия приведения справедливы для возмущений любого типа.

Условия эксплуатации РЗА на подвижных объектах требует рассмотрения условий работы ВЭС при полигармонических воздействиях.

Полигармонические возмущения кинематического типа задаются суммой

$$X(t) = \sum_{j=1}^n \xi_{j0} \sin(\omega_j t + \alpha_j), \quad (1.1)$$

где  $\xi_{j0}$  - амплитуда,  $\omega_j$  - частота,  $\alpha_j$  - начальная фаза  $j$ -й гармоники. Совокупность чисел  $\xi_{j0}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) образует амплитудный спектр воздействия.

Условия эффективности ВЭС при этом может отождествляться с

совокупностью ВЭС на каждой гармонике воздействия. Так, если цель

Условия приведения к эквивалентному виброизолятору.

Таблица 2

Схема подвеса	Условия приведения к эквивал. виброизолятору	Эквивалентный коэффци.	
		жесткости	демпфирования
	—	$n \sum_{k=1}^n c_k$	$n \sum_{k=1}^n b_k$
	$\frac{c_k}{a} = \frac{b_k}{a} =$ $= \lambda_k, \dots, n)$ a - нормируемое значение	$\frac{1}{n \sum_{k=1}^n \frac{1}{c_k}}$	$\frac{1}{n \sum_{k=1}^n \frac{1}{b_k}}$

ВСС состоит в уменьшении перегрузки  $\max(|X(t)|)$  объекта, условия эффективности эквивалентно выполнению неравенств

$$K_{\Sigma_j}(c_j, 2) \leq 1, (j=1, 2, \dots, n), \quad (1.10)$$

что равнозначно условиям ограниченности ordinат А.Ч.Х. системы в

заданными точках  $z = z_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ).

Условие (1.18) означает также, что система трансформирует спектр входного сигнала  $\{j\omega_j^2$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ); заданный спектр  $\{j\omega_j^2 k_{z_j}$  ( $z_j$ ) выходной переменной. Одной из важных характеристик полигармонического процесса является его дисперсия.

$$D_{\xi} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n k_{z_j}^2. \quad (1.19)$$

Дисперсия, определяемая суммой (1.19), не зависит от фазовых сдвигов между составляющими.

ВЭС, эффективная по снижению перегрузки объекта на каждой гармонике, окажется эффективной и по снижению дисперсии виброперегрузки, но не наоборот.

Проблематична задача перенастройки ВЭС при смене места установки РЭА на теле носителя и смене носителя, в связи с чем настоятельно необходимо средство, инструмент для технического персонала службы эксплуатации ремонта и обслуживания.

Представляется, что таким инструментом может быть цифровая модель ВЭС на базе ПЭВМ и пакета программ, позволяющей решать выше отмеченные задачи на месте, в полевых условиях, предоставляя пользователю меню, соответствующее поставленной задаче.

Исследования показали, что ЦМ ВЭС должна стать составной частью комплекса технических средств АРМЭТ (автоматизированного рабочего места радиотехника-технолога) который содержит комплект электронной измерительной аппаратуры, позволяющей выполнить измерения всех параметров движения несущего и несомого тел во всем диапазоне рабочих частот. В КТС АРМЭТ должен быть радиомodem для обеспечения связи с САПР фирмы разработчика на случай возникновения задач большой размерности.

Во второй главе обсуждаются теоретические положения оптимизации параметров виброзащитных систем радиозлектронной аппаратуры, устанавливаемой на подвижных объектах.

Ставится задача многокритериальной оптимизации. Критерии оптимизации ВЭС  $K_R$ ,  $K_{\Sigma}$ ,  $K_{M_0}$ , а также  $K_M$  - критерий минимума массы,  $K_C$  - критерий минимума стоимости,  $K_V$  - критерий минимума объема.

Известны методы многокритериальной оптимизации еще недостаточно разработаны, но дают возможность выбора, из множества допустимых решений, т.е. наилучших решений в ряду селекции и ограничений. Вводятся понятия условного и безусловного критериев предпочтения.

Постановка задачи оптимального синтеза.

Задачи оптимального синтеза связаны с противоречивыми требованиями.

Ограничения, связанные с желаемым качеством ВЭС для кинематически возбужденной, накладываются на функционалы от абсолютных ускорений, абсолютных скоростей, а так же производных абсолютных перемещений точек крепления ВЗУ.

$$A_{\omega}^{(r)} \{v_1(t), \dots, v_m(t)\} \leq A_{\omega 0}^{(r)}, \quad r=1, 2, \dots, l \quad (2.1)$$

где  $v_n(t)$  ( $n=1, 2, \dots, m$ ) - абсолютное ускорение некоторых точек виброизолируемого объекта.

Форма функционала (2.1) зависит от вида динамических воздействий. Ограничения по относительным перемещениям

$$B^{(r)} \{\delta_1(t), \dots, \delta_m(t)\} \leq B_0^{(r)}, \quad r=1, \dots, l \quad (2.2)$$

где  $\delta_n$  ( $n=1, 2, \dots, m$ ) - относительные перемещения ВМ. Форма функционалов  $B^{(r)}$  зависит от вида динамических воздействий.

Задача оптимального синтеза сводится к определению условного экстремума:

$$1. A \leq A_0, \quad B = \min \quad (2.3)$$

Необходимо, чтобы, если  $A \rightarrow 0$ , то и  $B \rightarrow 0$ , но при  $B \rightarrow 0$  функционал  $A$  может приобретать недопустимо большие значения.

При  $A \leq A_0$  находим безусловный экстремум

$$C = B \leq A, \quad (2.4)$$

где  $\rho$  - весовой множитель (имеющий смысл множителя Лагранжа).

Если  $V \leq V_{opt}$ , а минимизируется функционал  $A$ , то

$$C = A + \rho V. \quad (2.5)$$

Оптимальные значения  $V_{opt1}$  и  $A_{opt2}$  - значения  $V$  и  $A$ , полученные в результате решения задачи условного экстремума в случаях (2.4) и (2.5) при ограничениях  $A \leq A_{opt2}$  и  $V_{opt1}$  будут

$$V_{opt1} = V_{opt2} \text{ и } A_{opt2} = A_{opt1}.$$

#### Критерии оптимального синтеза

1. Минимаксные функционалы для детерминированных воздействий.

1.1. Одномерные системы: при ограничениях по модулю функционала

$$|A| \leq A_{ol} \quad (2.6)$$

ищем ВЭС, которая обеспечивает минимум функционала

$$V = \max |s(t)|. \quad (2.7)$$

1.2. Альтернатива 1.1: при ограничениях по модулю функционала

$|B| = B_{ol}$ , найти минимум функционала

$$A_v = \max |K(s)| \quad (2.8)$$

при кинематическом возмущении. Данный подход не накладывает ограничений на переходные процессы в системе.

2. Интегральные квадратичные функционалы (близкие к min - max по физическому смыслу).

2.1. Для кинематической виброизоляции

$$A_v = \int_0^{\infty} v^2(t) dt. \quad (2.9)$$

2.2. Для относительных перемещений

$$B = \int_0^{\infty} s^2(t) dt. \quad (2.10)$$

В качестве обобщенного критерия возможно принять условие (2.5)

$C = B + \rho A$  в которое (2.9), (2.10) входят в качестве функционалов.

2.3. Для случайных процессов.

2.3.1. Для кинематической виброизоляции

$$A_v = \sigma_v^2. \quad (2.11)$$

2.3.2. Для относительных переносных виброизоляций

$$B = \sigma_0^2 \quad (2.12)$$

Как и выше, задача формуруется критерием (2.5) в который в качестве функционалов входят (2.11), (2.12).

Так для относительных переносных в виброизоляторах существование ограничения выхода за допустимый уровень.

Для многомерных систем требуется минимизация нескольких функционалов, при этом задача становится неоднозначной, в этом случае используется понятие о минимизации по множеству Парето (или к.л. его модификации). Для случая оптимизации системы ВЭС минимизации подлежат векторная целевая функция:

$$f(u) = \langle f_1(u), \dots, f_m(u) \rangle \quad (2.13)$$

где  $u$  - точка функционального пространства  $U$ . Идется совокупность точек заданной области  $D \subset U$  множества  $\Pi$  всех оптимальных (по Парето) точек  $u^0$ . Точка  $u^0$  оптимальна по Парето, если в  $D$  не существует "лучшей точки", т.е. такой точки  $u^1$ , что

$$f_i(u) \leq f_i(u^0), \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (2.14)$$

При этом необходимо, чтобы в (2.14) хотя бы одно из равенств было строгое. Это означает, что любая из точек  $u \in \Pi$  является "лучшим" компромиссом, в том смысле, что в  $D$  уже нельзя найти другой точки  $u^1$ , такой что в  $f(u)$  нельзя уменьшить к.л. компоненту без увеличения хотя бы одной из остальных.

Значения множеств  $\Pi$  и  $f(\Pi)$  позволяют разработчику системы виброизоляции (обычно совместно с заказчиком) решать, какая из точек  $u \in \Pi$  может быть признанной наилучшей ("лучшей из лучших") при заданных условиях проектируемой системы виброизоляции.

В данном случае задается единый комбинированный критерий (по аналогии (2.4), (2.5))

$$C = \sum_{r=1}^m r_r \sigma_r^2 + \sum_{r=1}^m p_r A_r \sigma_r \quad (2.15)$$

где  $P$  - силовая виброизоляция;  $w$  - кинематическая виброизоляция;  
символы  $h_r$ ,  $\rho_r$  - весовые множители.

При назначении весовых множителей следует учитывать что:

1. Множители  $h_r, \rho_r$  в функционалах с наложенными ограничениями, являются функциями этих ограничений и не могут выбираться произвольно.

2. Соотношения между множителями в группе минимизируемых функционалов зависит от условий задачи.

3. Абсолютные значения всех множителей зависят от абсолютного значения множителя перед одним, первоначально, произвольно выбранным функционалом.

Например - безразмерная единица, как в (2.4) перед  $B$ , или (2.16)

$$\sum_{r=1}^3 \rho_r A_r(r) = \rho (\sigma_{wx}^2 + \sigma_{wy}^2 + \sigma_{wz}^2). \quad (2.16)$$

4. Физические размерности множителей при  $B$  и  $A_{p(w)}$  зависят

от выбора функционала и от того, перед каким функционалом в качестве весового множителя выбрана безразмерная единица.

В задачах оптимального проектирования постановка и решение задачи нахождения множества  $D$  - единый процесс.

Оценка этого решения представляется излучшим образом на цифровой имитационной модели, в процессе самой оптимизации, т.е. поиск множества допустимых решений и неформального анализа этих решений (представленных таблицами, графиками т.п.).

В третьей главе выполнены исследования и синтез цифровой модели ВЭС. Методология оптимального проектирования находится на стыке инженерных дисциплин, прикладной математики и вычислительной техники и делает первые шаги.

В § 3.1. выделены основные особенности задач оптимального проектирования.

1. Многокритериальность.

2. Определение допустимого множества решений задачи.

3. Построение допустимого множества решений.

4. Анализ множества допустимых решений с учетом неформализуемых критериев и отбор наиболее предпочтительных.

5. Параметры модели в большинстве случаев непрерывны. Объем области часто на порядок меньше объема априорного параллелепипеда П:

$$V_n = \prod_{j=1}^n (\alpha_j^{max} - \alpha_j^{min}), \quad (3.1)$$

где  $\alpha_j^{min}$  и  $\alpha_j^{max}$  - границы вариации параметров, образующие П.

6. Допустимые и парето-оптимальные множества, обычно, много-связные, не выпуклые, отсутствует информация о гладкости функций цели, имеется множество ограничений, размерность векторов параметров и критериев велика.

7. Анализ допустимого и парето-оптимального множеств решений и выбор наиболее предпочтительного варианта решений, из числа найденных и представляемых в САПР РЭА, относительно несложны.

В § 3.2. приведена постановка задачи проектирования ВЭС. В процессе проектирования учитывается три вида ограничений: параметрические, функциональные и критериальные.

Параметрические ограничения имеют вид

$$\alpha_j^{min} \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{max}, \quad j=1, r, \quad (3.2)$$

где  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_r)$  варьируемые параметры проектируемой ВЭС.

В качестве  $\alpha_j$  выступают коэффициенты демпфирования, жесткости и т.д.

Функциональные ограничения можно записать так:

$$c_1^{min} \leq f_1(\alpha) \leq c_1^{max}, \quad i=1, l. \quad (3.3)$$

Здесь  $f_1(\alpha)$  функционалы, зависящие от ограничения нормативного вида, нарушать которые нельзя, например, допустимые напряжения в элементах конструкции, виброускорение, виброскорость, вибропрямодвижение. Критерии качества (масса, КПД) всегда стремятся минимизировать. Очевидно, что ограничения (3.2) выделяет в  $r$ -мерном пространстве

параметров параллелепипеда  $\Pi$ , Ограничения (3.3) выделяют в  $\Pi$  подмножество  $\Phi$ , о котором предполагаем только то, что его объем положителен. Ограничения на критерии имеют вид

$$\Phi_{\nu}(\alpha) \leq \Phi_{\nu}^{\text{max}}, \quad \nu = \overline{1, k}, \quad (3.4)$$

где  $\Phi_{\nu}^{\text{max}}$  - это худшее значение критерия  $\Phi_{\nu}(\alpha)$ , на которое может согласиться проектировщик (и заказчик).

Заметим, что сформулировать значение  $\Phi_{\alpha}^{\text{max}}$  до решения задачи, как для  $C_1^{\text{max}}$  и  $C_1^{\text{min}}$ , не представляется возможным. Ограничения (3.2), (3.3), (3.4) определяют допустимое множество  $D$ , т.е. множество вариантов  $\alpha^1$  проекта, удовлетворяющих этим ограничениям, так что  $D \cap \Phi \subset \Pi$ .

Если функции  $f_1(\alpha)$ ,  $\Phi_{\nu}(\alpha)$  непрерывны в  $\Pi$ , то множества  $\Phi$  и  $D$  замкнуты.

Теперь можно сформулировать задачу оптимального проектирования.

Требуется найти такое множество  $P$  в  $D$  для которого

$$\Phi(P) = \min_{\alpha \in D} \Phi(\alpha), \quad (3.5)$$

где  $\Phi(\alpha) = (\Phi_1(\alpha), \dots, \Phi_k(\alpha))$  - вектор критериев (качества).

Решение данной задачи дает вектор  $\alpha^0 \in P$ , являющийся наиболее предпочтительным из всех векторов множества  $P$ .

(Оптимальное решение следует искать на всем множестве  $D$ , если не все основные критерии качества могут быть формализованы.

В § 3.3. приводится исследование пространства параметров в следующем порядке:

1. Составление таблиц испытаний, выполняемых на ЭВМ.

Выбирается  $N$  пробных точек  $\alpha^1, \dots, \alpha^N$  равномерно расположенных в  $\Phi$ . В каждой из точек  $\alpha^i$  вычисляются все локальные критерии  $\Phi_{\nu}(\alpha^i)$ .

По каждому из них составляется таблица испытаний

$$\Phi_{\nu}(\alpha^{i1}) \leq \Phi_{\nu}(\alpha^{i2}) \leq \dots \leq \Phi_{\nu}(\alpha^{iN}), \quad (3.6)$$

где  $i1, i2, \dots, iN$  - номера испытаний для каждого  $\nu$  своим.

2. Анализ таблиц (3.6) и назначение, если потребуется, новых критеримальных ограничений  $\Phi_{\nu}^{\text{max}}$  принимается решением проектировщика.

3. Проверка разрешимости задачи (3.5), выполняемой на ЭВМ.

Фиксируем какой либо из критериев  $\Phi_{\nu_1}(\omega)$  и рассматриваем соответствующую ему таблицу (3.6). Если  $S = SKM$  число значений в таблице соответствующим выбранному ограничению:

$$\Phi_{\nu_1}(\omega^{i1}) \leq \Phi_{\nu_1}(\omega^{i2}) \leq \dots \leq \Phi_{\nu_1}(\omega^{in}) \leq \Phi_{\nu_1}^{min} \quad (3.7)$$

Перебором значений  $\Phi_{\nu_1}(\omega^{i1})$  при всех  $\nu$ , проверяется есть ли среди точек  $\omega^{i1}, \dots, \omega^{in}$  хотя бы одна для которой справедливы все неравенства (3.4). Если такая точка имеется то множество  $D$ , определенное неравенствами (3.2), (3.3), (3.4), не пусто и задача (3.5) разрешима. Если нет - возврат к пункту 2 и принятие решения об "уступке". В случае, когда ослабление непрямолинейно - возврат к пункту 1, увеличение числа пробных точек, чтобы повторить пункт 2. Таким образом, процесс исследования пространства параметров итерационный.

Обеспечение заданной точности на допустимом множестве приводится в § 3.4. В качестве условий обеспечивающих заданную точность обозначим класс функций, с которыми мы работаем - они непрерывны и, кроме того, они удовлетворяют условию Липшица. Условия Липшица формализуем следующим образом - для любых векторов  $\alpha$  и  $\beta$  и области определения функции  $\Phi_{\nu}$  существует такое число  $L_{\nu}$ , что :

$$|\Phi_{\nu}(\alpha) - \Phi_{\nu}(\beta)| \leq L_{\nu} \max |\alpha_j - \beta_j| \quad (3.8)$$

или  $L_{\nu}$  такое, что:

$$|\Phi_{\nu}(\alpha) - \Phi_{\nu}(\beta)| \leq L_{\nu} \sum_{j=1}^r |\alpha_j - \beta_j| \quad (3.9)$$

Для аппроксимации  $\Phi(D)$  с точностью до  $(\epsilon_{\nu})^r$  достаточно чтобы:

$$\max_{\nu} \epsilon^r (L_{\nu} / (\epsilon_{\nu}))^r \quad (3.10)$$

Возможна оценка по специальному условию Липшица  $L_{\nu}$  также, что

$$|\Phi_{\nu}(\alpha) - \Phi_{\nu}(\beta)| \leq \sum_{j=1}^r L_{\nu}^j |\alpha_j - \beta_j| \quad (3.11)$$

в этом случае условие (3.10) принимает вид:

$$\max_{\nu} 2^r \left( \left( \sum_{j=1}^r L_{\nu}^j \right) / (\epsilon_{\nu}') \right)^r, \quad (3.12)$$

где  $(L_{\nu})$  - двоичное рациональное число, достаточно близкое к  $L_{\nu}$  и больше его (точно также  $(\sum_{j=1}^r L_{\nu}^j)$ );  $(\epsilon_{\nu}')$  - максимальное двоичное рациональное число, не превосходящее  $\epsilon_{\nu}$ , с тем же числителем, что и  $(L_{\nu})$   $(\sum_{j=1}^r L_{\nu}^j)$ ;  $r$  - значение индекса, соответствующее размерности куба  $K_{\nu}$ , в котором строится  $\Pi_{\nu}$  сетка. Априори (непрерывность критерия  $\Phi_{\nu}(\omega)$  и выполнение условия Липшица) процесс аппроксимации сходится. Другими словами: задаваясь допустимыми погрешностями  $\epsilon_{\nu}$  и зная константы  $L_{\nu}$ , при любых функциях, соответствующих этим константам, можно аппроксимировать всю допустимую область.

Алгоритм аппроксимации рассматривается в § 3.5. Приведенные выше положения справедливы для теоретических исследований. Представляется возможность предложить более "быстрый" алгоритм, который учитывает специфику каждой конкретной задачи. Ограничимся задачей аппроксимации области  $\Phi(\mathbb{D})$ . Это значит, что определены константы Липшица  $L_{\nu}$ ,  $\nu=1, k$ .

§ 3.6. Аппроксимация области Парето. В нашей задаче количество векторов, принадлежащих множеству Парето, относительно невелико и поэтому процедура исследования "подозрительных" точек конструктивна. Задаются система окрестностей любой точки  $X$  ( $X$  - пространство параметров) следующим образом: для любого  $\epsilon \in X$  определим окрестность

$$V_{\{\epsilon_{\nu}\}}(\omega) = \{\Phi(\mathbb{D}_{\{\epsilon_{\nu}\}})\}; \forall \Phi(\omega) \in X \exists \Phi(\eta) \in \Phi(\mathbb{D}_{\{\epsilon_{\nu}\}});$$

$$|\Phi_{\nu}(\omega) - \Phi_{\nu}(\eta)| < \epsilon_{\nu} \quad \forall \Phi(\gamma) \in \Phi(\mathbb{D}_{\{\epsilon_{\nu}\}}) \exists \quad (3.13)$$

$$\Phi(\eta) \in X: |\Phi_{\nu}(\gamma) - \Phi_{\nu}(\eta)| < \epsilon_{\nu}, \quad \nu=1, k.$$

В результате визуализации аппроксимированного множества Парето  $(P)$  конечным множеством получаем вид показанный на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Аппроксимация множества Парето конечным множеством.

Для определения множества "подозрительных" точек выполняется процедура

$$M_{\alpha}^{\circ} = \{ \phi(D) \cap \phi(D_{(\sigma_j)}) : \exists \gamma \in \Phi_{\gamma}(D) \geq \Phi_{\gamma}(\alpha) \} \quad (3.14)$$

$$M_{\alpha}^{(\sigma_j)} = \{ \phi(D) \cap M_{\alpha}^{\circ} : \exists \gamma \in \Phi_{\gamma}(D) - \Phi_{\gamma}(\alpha) \leq \sigma_j \sqrt{2} \}.$$

Значения  $\sigma_j \sqrt{2}$  можно выбрать произвольно  $0, 1 \sigma_j, \dots, 0, 9 \sigma_j$ , требуется лишь, чтобы это число было меньше  $\sigma_j$ .

$$\text{Пусть } M_{\alpha}^{\circ} = \phi(D_{(\sigma_j)}) \setminus (M_{\alpha}^{\circ} \cup \Phi(P_{(\sigma_j)})), \quad M_{\alpha} = M_{\alpha}^{(\sigma_j)} \cup M_{\alpha}^{\circ}; \quad M = \bigcup_{\alpha} M_{\alpha}.$$

На рис. 3.2 показано, что только в  $(\sigma_j)$ -окрестности из множества  $\Pi$  могут находиться точки  $\Phi(P)$ , не аппроксимированные с точностью до  $(\sigma_j)$  множества  $\Phi(P_{(\sigma_j)})$ .

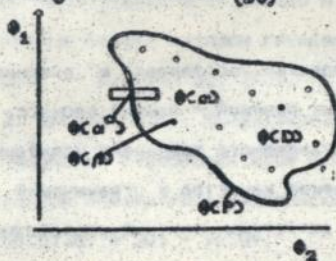


Рис. 3.2. Определение "подозрительной" точки.

$\Phi(\alpha^{\circ})$  - паретовская точка, лежащая в  $(\sigma_j)$ -окрестности;  $\Phi(\alpha)$  - "подозрительная" точка;  $\Phi(P)$  - множество Парето;  $\Phi(D)$  - множество допустимых решений.

Область D находится в процессе поиска. Пространство параметров - многомерное, а также в силу ограничений  $C_1^{\text{max}} = f_1(\alpha) = C_1^{\text{max}}, 1 = \overline{1, 6}$ .

$\Phi_{\gamma}(\alpha) \leq \Phi_{\gamma}^{\text{max}}, \sigma_j \sqrt{2} \cdot \pi$ , отношение объема D к объему  $\Pi$ ,  $\gamma$  - достаточно

точно малая величина. При достаточно большом числе равномерно рас-

положенных в  $P$  точек имеет место  $\gamma = V_D \sqrt{V_P} \approx N^* / N$ , где  $N$  - число точек  $\alpha^i \in P$ ;  $N^*$  - число точек попадания в  $D$ . Для большинства технических задач  $\gamma \leq 0,01$ .

Для реализации описанных выше процедур автором разработан пакет прикладных программ, в количестве 23 программных единиц, который поддерживает обмен информацией с базами данных САПР РЗА:

- БД "ВИБРОИЗОЛЯЦИЯ";
- БД "МОДЕЛИ ПРЕТЕНДЕНТЫ";
- БД "ДААННЕ ИСПЫТАНИЙ";
- БД "ПРИНЯТЫЕ ВЭС".

Он же является ядром ЦМ(ЦМП ВЭС) математического обеспечения диалоговой системы автоматизированного конструирования ВЭС РЗА для ПО.

- ПП "ВЫБОР" - выполняет выбор типа ВИ подходящего по критериям качества;

- ПП "ВЫБКООР" - выполняет выбор координат точек крепления на монтажном поле корпусов РЗА;

- ПП "СИМОД" - имитационные модели;

- ПП "КРИТЕРИИ" - вычисляет оптимизируемые критерии качества.

Подробное описание ППП дано в работе, Приложения 1А.

Акт внедрения системы "ВИБРОЗАЩИТА" приведен в Приложении 2.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

1. В задачах оптимального проектирования постановка и решение задачи получения множества допустимых решений - единый процесс.

Анализ допустимого множества, представляемого таблицами испытаний дает основание для переоценки критериев качества и ограничений.

Важно то, что анализируя множество допустимых решений, разработчик и заказчик косвенным образом оценивают и другие факторы, которые не удалось формализовать, и таким образом, сложный процесс осмысления и формирования расчетной модели, а вместе с ней и допустимого множества Парето - оптимальных решений, для уточненных или вновь

сформулированных критериев качества и ограничений, становится реальным за конечное число шагов. Одним из важных факторов этого процесса является согласование достигнутого качества локальной системы (ВЭС) с общей системой (подвижного узла связи), без чего достижение оптимума всей проектируемой системы - невозможно. Предлагаемый подход к решению задачи оптимизации проектирования и настройки ВЭС РЗА, устанавливаемой на подвижных объектах, может стать эффективным инструментом в руках практиков.

2. Предложен вариант метода оптимизации проектируемой системы по многим критериям качества и ограничений, развитый на основе метода оптимизации по Парето, путем отбора из множества допустимых нехудших решений.

3. Сравнение результатов работы с известными показывает, что предлагаемый вариант метода многокритериальной оптимизации может быть использован как в процессах разработки и эксплуатации ВЭС РЗА, устанавливаемой на подвижных объектах.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в работах.

1. Кондратьева Н.А., Бражко А.И. Прогнозирование структуры виброзащитных систем методом группового учета аргументов. // Прикладные задачи. - К.: УМК ВО, 1988.
2. Бражко А.И., Кондратьева Н.А. Прогнозирование оптимального расположения виброизоляторов линейных виброзащитных систем радиоэлектронной аппаратуры; Запорожский гос. ун-т, 1988. - 5с. Деп. Укр.НИИИТИ, 08.01.89 и 201 - Ук.89.
3. Кондратьева Н.А., Хебина С.В. Алгоритмическое конструирование систем виброизоляции радиоэлектронной аппаратуры для подвижных объектов. // Тезисы докладов научных конференций преподавателей и студентов Запорожского ун-ту. - Запорожье, 1994.
4. Клименко М.И., Кондратьева Н.А., Хебина С.В. Конечнэлементный анализ реакции многослойной цилиндрической оболочки на действие под-

вижної нагрузки. // Тези допов...

і студентів Запорізького ун-ту

Кондратьева Н.А. Исследование

вижної системи радіозлектронної апаратури, установлюваної на  
 подвижних об'єктах.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математи-  
 ческих наук по специальности 05.13.16.-применения вычислительной  
 техники, математического моделирования, математических методов в  
 научных исследованиях, Запорожский гос. ун-т, Запорожье, 1994.

Звядяється чотири наукових роботи, які містять дослідження в  
 області автоматизованого проектування радіозлектронної апа-  
 ратури з оптимізацією проектних рішень. Установлено, що є мож-  
 ливість пошуку оптимальних, по багатьом критеріям якості,  
 рішень в ряду селекції і обмежень. Осуществлено промислове  
 впровадження запропонованої методики.

Kondratjeva N. A. Research and elaborate of digital model of vibro-  
 protected system of the radioelectronical apparatus that seated on  
 moving objects.

Dissertation on the degree of candidate of physical-mathematical  
 sciences on speciality 05.13.16 - using calculating technique, ma-  
 thematical modeling, mathematical methods in scientific researches  
 Zaporozhye State University, Zaporozhye, 1994.

There are four scientific papers that include researches in the  
 field of automatically design of the radioelectronical apparatus  
 with the optimization of the design decisions. It is established  
 that there is a possibility of searching optimal on different  
 quality criterion's decisions in the line of limits. The industrial  
 introduction of the proposed methods is done.

ключові слова:

розв'язок допустимий, розв'язок оптимальний, математичне моделювання.