

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Робототехника и мехатроника»

**Методические указания**  
к выполнению практических работ  
по дисциплине  
**«Компьютерное**  
**проектирование в мехатронике**  
**и робототехнике»**

Автор  
Мироненко Р.С.

Ростов-на-Дону, 2015



## **Аннотация**

Методические указания предназначены для магистров очной формы обучения 15.04.06 «Мехатроника и робототехника».

## **Автор**

к.т.н., доцент Мироненко Р.С.



## Оглавление

Основные методы и средства проектирования .....	4
Практическое занятие №1 «Метод морфологических таблиц (морфологического анализа)».....	5
Практическое занятие №2 «Математические методы отыскания оптимальных проектных решений» .....	6
Практическое занятие №3 «Математические основы метода сканирования пространства параметров в функциях натурального ряда чисел» .....	10
Практическое занятие №4 «Многокритериальная оптимизация на основе множества критериев, заданных таблично» .....	16
Практическое занятие №5 «Разработка классификатора « типовые (покупные) комплектующие узлы мехатронных машин» .....	18

Целью выполнения практических работ является ознакомление с методиками решения задач проектирования с помощью:

- метода морфологических таблиц,
- математических методов отыскания оптимальных проектных решений,
- метода сканирования пространства параметров,
- многокритериальной оптимизации на основе множества критериев, заданных таблично;

а также с примером разработки классификатора «Типовые (покупные) комплектующие узлы мехатронных машин» по фасетно-иерархическому принципу классификации.

В качестве исходного материала для выполнения данных практических работ предлагается использовать результаты проектирования мехатронного модуля с поступательным перемещением выходного звена, полученные в ходе выполнения курсового проекта по дисциплине «Детали мехатронных модулей, роботов и их конструирование». Также можно использовать материалы курсового проекта по дисциплине «Проектирование мехатронных систем».

## **ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Все методы и средства проектирования можно разделить на эвристические и алгоритмические.

К эвристическим относятся методы элементарных вопросов, аналогий, методы «от целого к частному», «наводящих операций», фокальных объектов, опроса экспертов (метод интервью), метод коллективного мышления «мозговой штурм» и др.

Алгоритмические включают методы: графов зависимостей, сетки связей, предикатов, метод «через раздельное к целому», элементарных комбинаций, исключения избыточности, структурных карт, морфологических таблиц, феноменологических и математических моделей, минимизации и оптимизации структур и функций.

## **Практическое занятие №1 «Метод морфологических таблиц (морфологического анализа)»**

Метод основан на построении таблицы, в которой перечисляются все основные элементы, составляющие объект, и указываются все допустимые варианты реализации этих элементов. Комбинируя варианты реализации элементов объекта, можно получить самые неожиданные новые решения. Цель морфологического анализа — построить поле возможных проектных решений.

### **СХЕМА ОТЫСКАНИЯ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ ТАБЛИЦ**

1. Составить список имен (марок) функциональных узлов проектируемого устройства, с помощью которых можно реализовать функциональную структуру изделия в рамках возможностей разработчика и изготовителя с учетом ограничений на применение заказчиком.

2. Составить морфологическую таблицу, в которой каждая строка является вариантом проекта, а каждый столбец является типом функционального блока. Если вариант может быть реализован путем объединения функциональных блоков двух типов, например блок «двигатель асинхронный» и блок «редуктор» могут быть объединены в блок «мотор-редуктор», то для данной строки используется только одна колонка, например «редуктор». В ячейке таблицы, образованной пересечением строки и столбца, указывается имя функционального элемента в форме торговой марки, имени по классификатору базы данных разработчика, наименования по каталогу поставщика или другой форме, уникальной в рамках разрабатываемой таблицы.

3. Попытаться сформировать новые, неизвестные разработчику варианты, используя эвристические методы проектирования.

4. Выбрать один или несколько конкурентных оптимальных вариантов, применив соответствующий метод оптимизации.

## Практическое занятие №2

### «Математические методы отыскания оптимальных проектных решений»

Постановка задачи отыскания оптимального выбора параметров проектирования происходит следующим образом.

Задано множество противоречивых критериев качества:

$$\Phi_v(\alpha, t), \quad v = 1, 2, \dots, V,$$

где  $t$  — параметр, характеризующий процесс;  
 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_j)$  — вектор переменных параметров проектирования, на которые могут накладываться следующие ограничения:  
- параметрические:

$$\alpha_{1,j} \leq \alpha_j \leq \alpha_{2,j}, \quad j = 1, 2, \dots, J,$$

имеющие чаще всего физическую, конструктивную или технологическую природу;

- функциональные:

$$c_{r,1} \leq \varphi_r(\alpha) \leq c_{r,2}, \quad r = 1, 2, \dots, R,$$

где  $\varphi_r(\alpha)$  — функции, определяющие отношения между параметрами;

- критериальные:

$$\Phi_{v,1} \leq \Phi_v(\alpha, t) \leq \Phi_{v,2},$$

где  $\Phi_{v,1}, \Phi_{v,2}$  — границы допустимых (с точки зрения проектировщика или иных мотивов) значений критерия  $\Phi_v(\alpha), v = 1, 2, \dots, V$ .

Математические выражения, задающие перечисленные выше ограничения, считаются критериями-ограничениями.

Функциональные зависимости  $\varphi_r(\alpha)$  и критерии качества  $\Phi_v(\alpha, t)$  могут быть функциями, функционалами или операторами, примененными к функциям, могут задаваться в виде формул, таблиц или иных математически корректных отношений.

Параметрические ограничения выделяют в  $J$ -мерном гиперпространстве параметров множество  $A$ , функциональные ограничения выделяют множество  $G$ , критериальные ограничения выде-

ляют множество  $D$ . Пересечение множеств  $A$ ,  $G$  и  $D$  выделяет в  $J$ -мерном гиперпространстве параметров множество допустимых параметров оптимизации  $P$ .

Множество критериев качества должно быть противоречивым. Если для критерия качества определено понятие экстремумов на множестве  $P$ , то критерии качества, все экстремумы которых совпадают, считаются непротиворечивыми. Из множества непротиворечивых критериев выбирается один.

Если  $V = 1$  и  $J = 1$ , то задача считается однокритериальной, однопараметрической. Если  $V > 1$  и  $J = 1$ , то задача считается многокритериальной, однопараметрической. При  $V = 1$  и  $J > 1$  задача — однокритериальная, многопараметрическая. Если  $V > 1$  и  $J > 1$ , то задача — многокритериальная, многопараметрическая.

Значение вектора параметров  $\alpha_k \in P$  называется допустимой моделью. Если допустимая модель доставляет полезный экстремум критерию качества в однокритериальной задаче, то она является оптимальной моделью и является решением задачи оптимизации.

Для единообразия описания будем считать, что в любом случае полезным экстремумом критерия качества является минимум, так как всегда можно ввести операцию  $\Phi_v(\alpha)^{-1} \rightarrow \min$ , если  $\Phi_v(\alpha) \rightarrow \max$ .

Методы решения однокритериальных однопараметрических (одномерных) задач зависят от математической формы представления критерия качества, опубликованы в многочисленной справочной литературе и особых вычислительных трудностей не содержат.

При решении однокритериальных многопараметрических (многомерных) задач важную роль играет линейность или нелинейность критерия качества.

Если критерий качества — линейная функция, то отыскание оптимальной модели для нее называется решением задачи линейного программирования, если нелинейная, то — нелинейного программирования, в общем случае — математического программирования.

Для решения задачи линейного программирования наиболее популярным является симплекс-метод и прямые методы минимизации (равномерного поиска (сканирования), поразрядного поиска, случайного поиска).

Задача нелинейного программирования более сложна в решении. Это связано с тем, что в допустимом пространстве моделей могут встречаться модели, доставляющие минимум функции в некоторой окрестности точки  $\alpha_k$  (локальный минимум), но не являющиеся минимумом на всем множестве  $P$ , так как могут быть значения других локальных минимумов  $\alpha_s$ :

$$\Phi_v(\alpha_s) < \Phi_v(\alpha_k).$$

Для решения задач нелинейного программирования могут применяться, например, методы множителей Лагранжа, Хука — Дживса, Пауэлла, Розен брокра, Хелдера — Мида, а также методы градиентного спуска, наискорейшего спуска, Гаусса — Зейделя, сопряженных направлений, Давидона — Флетчера — Ривса, прямые методы сканирования.

Если задача многокритериальная, то возникает проблема отыскания компромисса между противоречивыми критериями качества. Эта проблема имеет несколько концептуальных различий (парадигм, стратегий, принципов). К ним можно отнести оптимальность по Парето (в смысле Эджвуда и смысле Слейтера (слабая оптимальность)); принципы эффективности Джерри; принципы равенства и суммарной эффективности; принцип Нэша; принципы компромисса, доминирующего или гарантированного результата; стратегия наименьшего уклонения; стратегии, построенные на использовании лямбда-критерия или альфа-критерия Гурвица; стратегии взвешенных сумм, достижения максимума функции неопределенности; стратегия цели Гембики; человеко-машинные стратегии, основанные на экспертных оценках, на мотивированном интересе и т.п.

Эти и иные стратегии поддерживаются многочисленными методами, их реализующими. При выборе любого метода встает проблема согласования размерностей критериев качества, которая решается путем нормализации критериев.

В качестве методов нормализации может применяться, например, преобразование к безразмерным величинам:

$$f_v(\alpha) = \frac{\Phi_v(\alpha)}{\rho[\Phi_v(\alpha)]},$$

где  $\rho[\Phi_v(\alpha)]$  - некоторая величина, например, длина шкалы отсчета по критерию  $\Phi_v(\alpha)$ , максимум критерия  $\Phi_v(\alpha)$  и т.п.

К методам нормализации также относятся приведение к одной размерности:

$$f_v(\alpha) = \Phi_v(\alpha) \cdot M(\alpha),$$

где  $M(\alpha)$  - нормирующая функция; естественная нормализация:

$$f_v(\alpha) = \frac{[\Phi_v(\alpha) - \min \Phi_v]}{(\max \Phi_v - \min \Phi_v)},$$

где  $\max \Phi_v$  и  $\min \Phi_v$  - это экстремумы функции  $\Phi_v(\alpha)$  на множестве  $\alpha \supseteq A$ .

Множество критериев  $\Phi_v(\alpha)$ ,  $v = 1, 2, \dots, V$  часто задают в форме вектора:

$\Phi(\alpha) = [\Phi_1(\alpha), \Phi_2(\alpha), \dots, \Phi_v(\alpha), \dots, \Phi_V(\alpha)]$ , одним из атрибутов которого является свертка. В качестве сверток могут применяться любые виды норм вектора; свертки линейные; свертки минимизационные или максимизационные; свертки произведения; свертки в форме функций Кобба — Дугласа; прочие формы.

Задача многокритериальной и многомерной оптимизации сочетает в себе как проблему выбора стратегии, так и проблему математического программирования. Выбор как стратегии, так и метода ее обеспечения существенно зависит от предметной области поиска оптимальных решений. Проектирование изделий мехатроники связано с отысканием проектных параметров класса машин, который имеет четкие границы, определен в конструкторско-технологическом отношении, базируется на установившемся рынке комплектующих. Поэтому наиболее востребованы стратегии и методы оптимизации, которые доказали свою эффективность и базируются на курсах математики, читаемых в технических учебных заведениях и позволяющих использовать распространенные доступные и универсальные компьютерные средства выполнения расчетов типа MathCAD.

## Практическое занятие №3

### «Математические основы метода сканирования пространства параметров в функциях натурального ряда чисел»

Рассматриваются отображения  $F: X \rightarrow Y$ , где  $X$  и  $Y$  — множества действительных чисел, а  $F$  — вид отображения — функция, функционал или оператор. Во множестве  $X$  выделяются подмножества  $A_j \subseteq X$  (кортежи), из конечного числа дискретных элементов  $\alpha_j$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , численные значения которых в приложениях могут меняться в установленных границах  $\alpha_{1,j} \leq \alpha_j \leq \alpha_{2,j}$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , с шагом  $\Delta\alpha_j < \alpha_{2,j} - \alpha_{1,j}$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ . Эти подмножества будем рассматривать как параметры.

Объединение подмножеств  $A_j$  назовем подмножеством  $A \subseteq X$ . В различных приложениях параметрами могут быть размеры и характеристики материала деталей машин, значения настроек регуляторов следящих систем, распределения инвестиций в объекты проектирования и т. п. Эти параметры дискретны по своей природе.

Мощность каждого подмножества  $A_j$  можно определить как

$$\Theta_j = \text{ceil} \left[ \frac{\alpha_{2,j} - \alpha_{1,j}}{\Delta\alpha_j} \right] / \Theta_j \cdot \Delta\alpha_j \leq \alpha_{2,j}, \quad (3.1)$$

где  $\text{ceil}(\ast)$  — операция округления действительного числа до большего ближайшего целого.

Каждый фиксированный набор значений  $\alpha_{j,i}$ ,  $j=1, 2, \dots, J < \infty$ ,

$i=1, 2, \dots, I < \infty$ , рассматривается как  $J$ -мерный вектор  $\alpha_i = (\alpha_{1,i}, \alpha_{2,i}, \dots, \alpha_{j,i}, \dots, \alpha_{J,i})$ . Мощность конечномерного векторного множества  $\alpha$  составит  $I = \Theta_1 \Theta_2 \dots \Theta_j \dots \Theta_J$ . Вектор

$\alpha_i$  можно рассматривать как член последовательности, определенной на множестве натурального ряда первых  $I$  чисел. Так как

у каждой  $j$ -ой компоненты последовательности  $\alpha_i$  общая область определения  $1 \leq i \leq I$ , то отображения  $J$ -мерного вектора можно заменить одномерным отображением натуральной переменной, что позволяет снизить размерность математических отношений — функций, функционалов, операторов, — и, что очень важно, реализовать двухмерную визуализацию многомерных пространств. В этом случае мы получим новое отображение  $F: \{X_1 I\} \rightarrow Y$ .

Замену действительной дискретной переменной ее номером во многих приложениях называют кодированием. Введем следующее правило кодирования. Пусть между любой тройкой подмножеств  $A_j$  выполняется прямое (декартово) произведение  $A_k \subseteq A_s A_l, k \neq s \neq l, k, s, l = 1, 2, \dots, J$ . Рассмотрим  $J$ -мерное пространство параметров с осями  $r_j, j = 1, 2, \dots, J$ .

Введем натуральную переменную для каждой оси  $r_j: \theta_j = 1, 2, \dots, \Theta_j$ . Тогда действительная дискретная переменная

$$\alpha_j(\theta_j) = \alpha_{1,j} + \Delta\alpha_j(\theta_j - 1) \leq \alpha_{2,j} \quad (3.2)$$

будет отображением  $\alpha_j$  в функциях натуральной переменной  $\theta_j$  с потерей последнего неполного отсчета (левосторонняя дискретизация), а  $\alpha_{r,j}(\theta_j) = \alpha_{2,j} + \Delta\alpha(\theta_j - \Theta_j) \geq \alpha_{1,j}$  будет отображением  $\alpha_j$  в функциях натуральной переменной с потерей первого неполного отсчета (правосторонняя дискретизация). В дальнейшем будем использовать только форму  $\alpha_j(\theta_j)$ , так как форма  $\alpha_{r,j}(\theta_j)$  не меняет сущности выводов и результатов.

Переменная  $\theta_j$  отражает нумерацию элементов кортежей  $A_j \subseteq X$  и является локальной целочисленной переменной для



$A_j$ . Элементы  $\theta_j$  задают также вектор с целочисленными компонентами  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_J)$ .

Если через каждую ось  $r_j \alpha_j$  (т.е. в каждой точке  $\theta_j$ ) провести нормальную гиперплоскость, то пространство  $A$  будет разбито на  $J$ -мерные элементы с ребрами  $\Delta \alpha_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ . Каждому такому элементу можно присвоить номер  $i$ :  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $I = \Theta_1 \Theta_2 \dots \Theta_J$ , который является глобальной переменной пространства  $A$ .

Примем следующее правило назначения номеров элементов при заданных номерах дискретных элементов кортежей  $\theta_j : \theta_j = 1, 2, \dots, \Theta_j, j = 1, 2, \dots, J$ :

$$i(\theta) = \theta_1 + \Theta_1(\theta_2 - 1) + \Theta_1 \Theta_2(\theta_3 - 1) + \dots + \Theta_1 \Theta_2 \dots \Theta_{J-1}(\theta_J - 1), \quad (3.3)$$

или в компактной форме:

$$i(\theta) = \theta_1 + \sum_{j=2}^J (\theta_j - 1) \prod_{k=1}^{j-1} \Theta_k. \quad (3.4)$$

Выражения (3.3) и (3.4) будем называть решением прямой задачи кодирования элементов пространства параметров  $i = f(\theta)$ , которое ставит в соответствие номер элемента пространства  $A \subseteq X$  заданному набору элементов подпространств  $A_j \subseteq X, j = 1, 2, \dots, J$ , заданных исходным вектором  $\theta$ . Отметим, что правило кодирования (3.3) не единственное, и таких правил можно предложить очень много.

Естественно, что важно найти способ нахождения значений вектора  $\theta$ , при заданном значении номера элемента  $i \in I$ . Решение такой задачи будем называть решением обратной задачи кодирования элементов пространства параметров, которое ставит

в соответствие каждому номеру элемента пространства  $A \subseteq X$  номера элементов подпространств  $A_j \subseteq X, j = 1, 2, \dots, J$ .

Решение обратной задачи предложено искать в рекуррентной форме:

$$\theta_j(i) = K_{j-1}(i) - \Theta_j \text{floor} \left\{ \Theta_j^{-1} \left[ K_{j-1}(i) - 1 \right] \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, J, i = 1, 2, \dots, I, \quad (3.5)$$

где  $K_{j-1}(i) = 1 + \left[ K_{j-2}(i) - 1 \right] / \Theta_{j-1}, j = 2, 3, \dots, J$ , иначе  $i$  при  $j = 1$ , а  $\text{floor}(\ast)$  — операция округления числа до ближайшего меньшего целого.

Тогда (3.2) примет вид

$$\alpha_{j,i} = \alpha_j \left[ \theta_j(i) \right] = \alpha_{1,j} + \Delta \alpha_j (\theta_j(i) - 1) \leq \alpha_{2,j}. \quad (3.6)$$

Рассмотренный выше прием реализует сканирование пространства дискретно заданных параметров в функциях аргумента натурального ряда чисел. Ниже на рис. 1 приведен пример сканирования, поясняющий его сущность.

Взаимные соответствия задач кодирования							
$i$	$\theta_{1,i}$	$\theta_{2,i}$	$\theta_{3,i}$	$i$	$\theta_{1,i}$	$\theta_{2,i}$	$\theta_{3,i}$
1	1	1	1	16	1	1	2
2	2	1	1	17	2	1	2
3	3	1	1	18	3	1	2
4	1	2	1	19	1	2	2
5	2	2	1	20	2	2	2
6	3	2	1	21	3	2	2
7	1	3	1	22	1	3	2
8	2	3	1	23	2	3	2
9	3	3	1	24	3	3	2
10	1	4	1	25	1	4	2
11	2	4	1	26	2	4	2
12	3	4	1	27	3	4	2
13	1	5	1	28	1	5	2
14	2	5	1	29	2	5	2
15	3	5	1	30	3	5	2

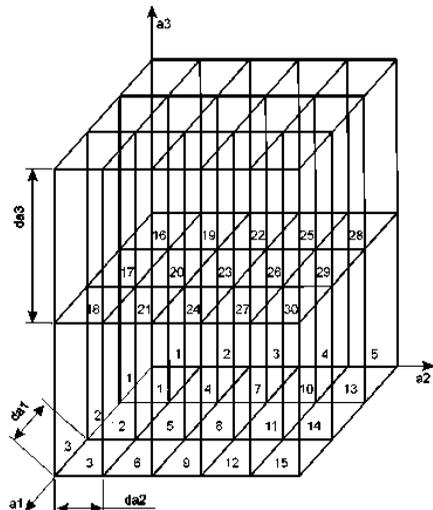


Рисунок 1 Пример разбиения пространства параметров  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  на элементы и взаимные соответствия задач кодирования

Таким образом, многомерные математические отношения, заданные в пространстве действительных чисел, могут снижать свою размерность за счет кодирования, что обеспечивает их визуализацию.

Трудоемкость метода.

Прямая задача кодирования содержит  $N_{\alpha, nз} = 2J - 2$  операций сложения и  $N_{m, nз} = J(J - 1) / 2$  операций умножения; обратная задача кодирования содержит  $N_{\alpha, оз} = J(3J + 1) - 1$  операций сложения и  $N_{m, оз} = 2J$  операций умножения.

Метод ориентирован на пространства параметров, заданных дискретно. В этом случае за шаг дискретизации  $\Delta\alpha_j$  принимается минимальная дискретность из всех  $j = 1, 2, \dots, J$ .

Применение метода сканирования к параметрам, заданным непрерывными множествами.

Если параметры непрерывны, то встает вопрос о выборе величины  $\Delta\alpha_j \forall j = 1, 2, \dots, J$ , т.к. при больших значениях

$\Delta\alpha_j$  возможна высокая погрешность и даже недостоверность решения задачи. Во многих случаях правильно выбрать значения  $\Delta\alpha_j \forall j = 1, 2, \dots, J$  можно на основании многомерной теоремы отсчетов Уиттекера, Котельникова, Шеннона, Найквиста, если многомерная модель  $f(\alpha)$  имеет конечный многомерный спектр Фурье разложения.

Полученные значения функции могут быть округлены с точностью до разрядности ЭВМ, т. е. получены квантованные значения. Такой прием широко применяется при вводе аналоговых сигналов в ЭВМ и для рассматриваемой задачи является распространением дискретизации и квантования на многомерный случай с преобразованием поля действительного переменного в ряд натуральных чисел. Приложения рассмотренного подхода могут распространяться на функции, функционалы, операторы, функциональные матрицы и векторные функции. Функции могут быть определены символьно или таблично.

Объединение функций, заданных таблично и символьно.

Если функции заданы таблично, то они определены номером строки или столбца  $i = 1, 2, \dots, I$  и по самой форме определения являются функциями натурального ряда чисел. Но если в решаемую задачу входит рассмотрение взаимодействия нескольких функций, как табличных, так и символьных, то встает вопрос об объединении их областей определения.

Рассмотрим этот прием. Строится таблица вариантов выбора параметров, которая является матрицей  $m \times n$ , где  $m$  — количество вариантов, а  $n$  — количество характеристик каждого варианта. Например, нужно выбрать торговую марку и тип двигателя этой марки. Рынок предлагает  $m$  подходящих по техническим требованиям двигателей, но каждый из  $m$  вариантов отличается характеристиками, например, стоимостью, сроком службы, массой, моментом инерции ротора, установленной номинальной мощностью, номинальным моментом и частотой вращения, пусковым током и т. п. Все эти характеристики входят полностью или частично в функции, заданные символьно. Если рассматривать все множество параметров двигателя в рамках метода сканирования, то его трудоемкость станет крайне высокой. Чтобы этого избежать, номер варианта выбора объявляется параметром

$\alpha_j : \alpha_{1,j} = 1 \leq \alpha_j \leq \alpha_{2,j} = m, \quad 1 \leq j \leq J$ , и  $\alpha_j$  вводится в

общую систему параметров. После нахождения искомого номера  $I_p$ ,  $1 \leq I_p \leq I$  по параметру  $\alpha_j, I_p$ , находится вариант в таблице, обеспечивающий решение поставленной задачи

Объединение разнородных параметров.

В приложениях часто возникают задачи поиска моделей с разнородными параметрами, например, моделей процессов, развивающихся во времени, но зависящих от настроек других параметров. Характерный пример — отыскание параметров регулятора следящей системы, обеспечивающей минимум максимума переходного процесса (задачи на минимакс). В этом случае время объявляется одним из параметров метода сканирования.

## Практическое занятие №4

### «Многокритериальная оптимизация на основе множества критериев, заданных таблично»

На практике часто возникает типовая проектная задача, состоящая в том, что из альтернативного множества  $I$  комплектующих или вариантов проекта надо выбрать удовлетворяющие множеству ограничений  $J$ , оптимальные в силу заданного множества  $V$  показателей качества (значений критериев качества). Такое описание формирует таблицу (матрицу)  $I \times V$ . В этом случае применять сканирование не нужно, так как строки, в которых записаны численные характеристики (значения критериев качества) уже пронумерованы от 1 до  $I$ . Рассмотрим процедуру оптимального выбора как решение следующей задачи.

Задача «Определение EP-моделей на основе множества критериев, заданных таблично».

Исходные данные: база данных выбираемых объектов; список характеристик вариантов выбора (параметров)  $\alpha_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ , численные значения которых могут меняться в установленных границах (параметрических ограничениях)

$\alpha_{\min,j} \leq \alpha_j \leq \alpha_{\max,j} \quad \forall j = 1, 2, \dots, J$ , либо быть качественными (например, тип корпуса, способ монтажа); список характеристик вариантов выбора, составляемый по списку  $\alpha_j$ ,  $j=1, 2, \dots, J$ , которые в рамках данного проекта должны достигать своих экстремумов  $\Phi_v$ ,  $v = 1, 2, \dots, V$ . Для единообразия примем за полезные экстремумы минимумы, взяв за  $\Phi_v = 1 / \Phi_v^+$ , где  $\Phi_v^+$  - полезный экстремум-максимум.

Решение.

1. Составим список допустимых вариантов выбора  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  («Список А»). Вариант считается допустимым, если все его численные характеристики лежат в интервале  $\alpha_{\min,j} \leq \alpha_j \leq \alpha_{\max,j}$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$ , а качественные характеристики соответствуют требуемым. Впрочем, качественным характеристикам тоже можно придать количественные значения, например, пронумеровав типы корпусов или способы монтажа.

2. Заполним таблицу «Tab\_Ф» (таблица 1).

Таблица 1

«Tab\_Φ»

<i>Tab_Φ</i> =	<i>i</i>	$\Phi_1$	$\Phi_2$	...	$\Phi_v$	...	$\Phi_v$	Примечания
	1	$\alpha_{1,1}$	$\alpha_{1,2}$	...	$\alpha_{1,v}$	...	$\alpha_{1,v}$	
	2	$\alpha_{2,1}$	$\alpha_{2,2}$	...	$\alpha_{2,v}$	...	$\alpha_{2,v}$	
	...	...	...	...	...	...	...	
	<i>I</i>	$\alpha_{I,1}$	$\alpha_{I,2}$	...	$\alpha_{I,v}$	...	$\alpha_{I,v}$	

3. Нормализуем характеристики в каждой *v*-ой колонке, выполнив операцию . Составим таблицу «Tab\_F» (таблица 2).

Таблица 2

«Tab\_F»

<i>Tab_F</i> =	<i>i</i>	$F_1$	$F_2$	...	$F_v$	...	$F_v$	Примечания
	1	$\hat{f}_{1,1}$	$\hat{f}_{1,2}$	...	$\hat{f}_{1,v}$	...	$\hat{f}_{1,v}$	
	2	$\hat{f}_{2,1}$	$\hat{f}_{2,2}$	...	$\hat{f}_{2,v}$	...	$\hat{f}_{2,v}$	
	...	...	...	...	...	...	...	
	<i>I</i>	$\hat{f}_{I,1}$	$\hat{f}_{I,2}$	...	$\hat{f}_{I,v}$	...	$\hat{f}_{I,v}$	

4. Применив процедуры п. 3...4 решения данной задачи, найдем оптимальные по Парето номера вариантов выбора.

## Практическое занятие №5

### «Разработка классификатора « типовые (покупные) комплектующие узлы мехатронных машин»

1. Выбираем родовое понятие «Типовые (покупные) комплектующие узлы мехатронных машин».

2. Составляем список оснований для деления родового понятия так, что бы неделимым понятием была торговая марка типового узла.

3. Выбираем фасетно-иерархический принцип классификации.

4. В качестве основания деления указателей фасет выбираем структуру основных функциональных блоков однопроцессорного мехатронного устройства с неподвижным ВМЗ (см. рис. ниже). Указатель фасета кодируем буквами кириллицы. Внутри фасета используется фасетно-иерархический принцип, структура которого определяется типом классифицируемого узла. Для кодирования рубрик применяется цифровой код. Результат классификации приведен ниже. С целью сокращения глубины классификатора последним неделимым понятием является понятие «Торговая марка и тип (имя) изделия» (в дальнейшем — марка), характеризующееся набором технических характеристик.

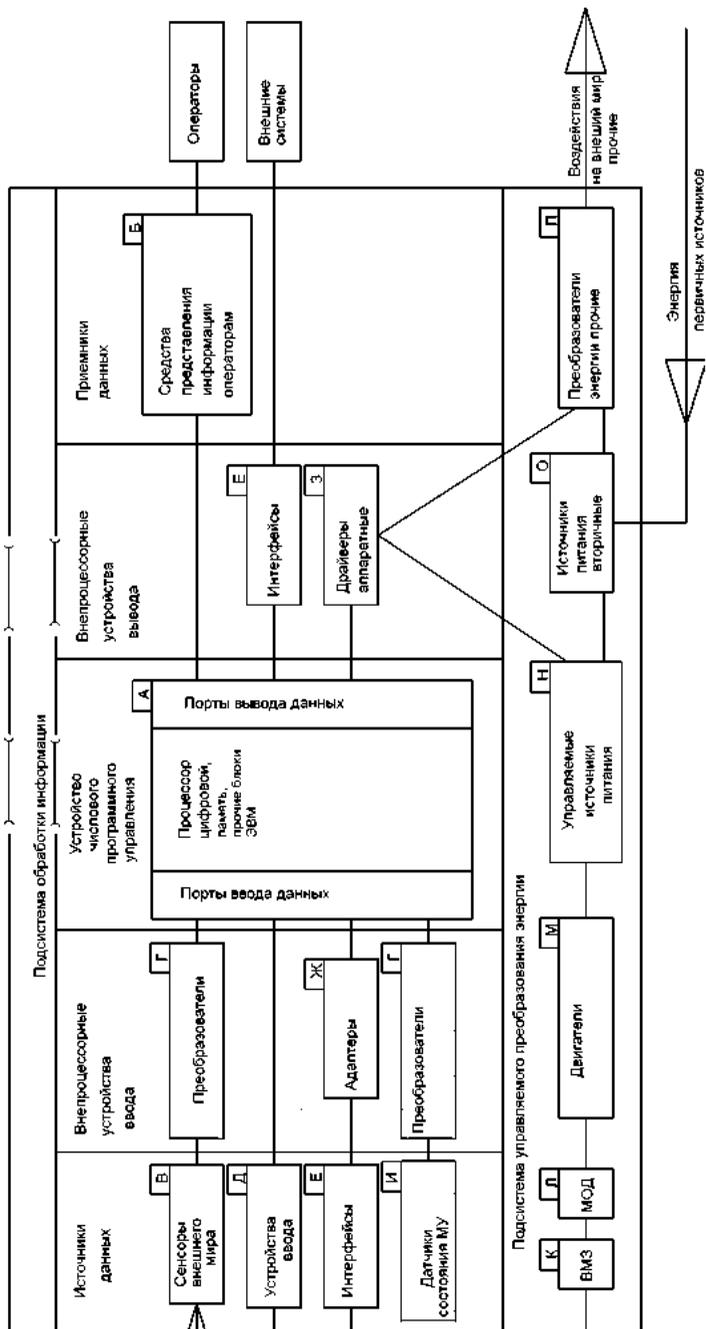
Среди характеристик марки можно выделить показатели назначения, характеризующие данное изделие по основному служебному назначению (основным функциям), и общие для многих видов технической продукции общие технические показатели (ОТП). К ОТП относятся следующие характеристики.

1. Показатели исполнения:

- по устойчивости к окружающей среде (диапазон рабочих и допустимых температур, °С, и давлений, Па, допустимая влажность, %, степень химзащиты, биозащиты, радиационной защиты, по ГОСТ 12997-76, ГОСТ 17785-72, ГОСТ 17786-72);

- по устойчивости к механическим воздействиям по ГОСТ 17167-71, ГОСТ 12997-76;

## Робототехника и мехатроника





- по требованиям к динамическим характеристикам с указанием способа нормирования (переходной характеристикой, временем переходного процесса до 0,9 установившегося значения, иными способами по ГОСТ 8.009-84);

- по перегрузкам с ударным воздействием с указанием амплитуды,  $m$ , и частоты, Гц;

- по степени защиты от проникновения твердых тел и жидкости по ГОСТ 14254-80 (устанавливается 7 степеней защиты (от 0 до 6) от попадания внутрь твердых тел и 9 степеней защиты (от 0 до 8) от проникновения жидкости (для обозначения степени защиты используется аббревиатура IP, например IP54));

- по климатическому исполнению по ГОСТ 15150-69 (У(N) – умеренный климат, ХЛ (NF) — холодный климат, ТВ (TH) — тропический влажный климат, ТС (TA) — тропический сухой климат, О (U) — все климатические районы, на суше, реках и озерах, М — умеренный морской климат, ОМ — все районы моря, В — все макроклиматические районы на суше и на море);

- по циклопрочности;

- по категории размещения (на открытом воздухе, в помещениях, где температура и влажность не отличаются от открытого воздуха, в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, в помещениях с искусственным регулированием климатических условий, в помещениях с повышенной влажностью (длительное наличие воды или конденсированной влаги));

- по габаритным, присоединительным и монтажным размерам;

- по количеству механически не связанных сборочных единиц (мультиблочный, моноблочный, мультиплатный, одноплатный, однокристалльный).

2. Показатели надежности: средняя наработка на отказ, ч; средний срок службы, лет; среднее время восстановления, ч.

3. Показатели технико-экономические: цена поставки, руб.; масса, кг; потребляемая мощность, Вт.

4. Показатели безопасности: механическая прочность устройства или его элементов к допустимым ударным воздействиям с указанием амплитуды,  $m$ , частоты, Гц; электрическая прочность изоляции, В; класс электроизоляции, электрическое сопротивление изоляции, Ом; степень защиты, требования по защите от поражения электрическим током (обязательное зануление, защита от несанкционированного доступа и т. п.).

Кроме основных характеристик марки для разработчика могут быть важны сведения о производителе изделия, чертежи кон-



струкции выбираемого изделия, схемы его подключения, особенности применения узла и подобные данные. Чтобы не усложнять структуру классификатора и создаваемой на его основе базы данных, в характеристику марки вводится раздел «Справочные данные».

#### КЛАССИФИКАТОР 1.1.

#### ТИПОВЫЕ (ПОКУПНЫЕ) КОМПЛЕКТУЮЩИЕ УЗЛЫ

#### МЕХАТРОННЫХ МАШИН

#### А. Устройства числового программного управления.

А.1. Многоплатные ЭВМ в одном или нескольких корпусах (промышленные компьютеры, станции контроля и управления) при поставке комплексами различной конфигурации (основание для деления «Компоновка»).

А.1.1. С процессором, выполненным по архитектуре типа Complex Instruction Set Computers (CISC) (основание для деления «Архитектура»).

А.1.1.1. Неперепрограммируемым (основание для деления «Способ редактирования программ»).

А.1.1.1.1. Технические характеристики марки и типа.

А.1.1.1.2. Перепрограммируемым на стенде.

А.1.1.2.1. Технические характеристики марки и типа.

А.1.1.3. Перепрограммируемым в мехатронном устройстве.

А.1.1.3.1. Технические характеристики марки и типа.

А.1.2. С процессором, выполненным по архитектуре типа Reduced Instruction Set Computers (RISC).

(Далее по типу А.1.1... с заменой А.1.1... на А.1.2...)

А.1.3. С процессором, выполненным по архитектуре типа Digital Signal

Processor (DSP).

(Далее по типу А.1.1... с заменой А.1.1... на А.1.3...)

А.1.4. С процессором, выполненным по архитектуре типа Neuro Processor (NC).

(Далее по типу А.1.1... с заменой А.1.1... на А.1.4...)

А.1.5. С процессором, выполненным по архитектуре типа Fazzi Processor (FC).

(Далее по типу А.1.1... с заменой А.1.1... на А.1.5...)

А.1.6. С процессором, выполненным по архитектуре иных типов.

(Далее по типу А.1.1... с заменой А.1.1... на А.1.6...)

А.2. Монокорпусные, настольные.

(Далее по типу А.1... с заменой А.1... на А.2...)

А.3. Монокорпусные, встраиваемые в панели.

(Далее по типу А.1... с заменой А.1... на А.3...)

А.4. Комбинированные, имеющие как настольные, так и панельные блоки.

(Далее по типу А.1... с заменой А.1... на А.4...)

А.5. Одноплатные ЭВМ, состоящие из отдельных микросхем процессоров и обвязки, смонтированных на одной плате, имеющих электрические соединители (разъемы) для подключения в систему.

(Далее по типу А.1... с заменой А.1... на А.5...)

А.6. Однокристалльные ЭВМ (микроконтроллеры), состоящие из одной микросхемы, выполняющей функции процессоров и обвязки, смонтированной на одной плате, имеющей электрические разъемы.

(Далее по типу А.1... с заменой А.1... на А.6...)

Параметры выбора марки и типа устройства числового программного управления.

Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: разрядность системной шины, бит (байт); численные характеристики памяти (ОЗУ, ПЗУ, ППЗУ, ВЗУ, флеш памяти), кбайт (Мбайт, Гбайт); быстродействие (тактовая частота, Гц (кГц, МГц)), количество миллионов типовых операций в с, МОПС (MIPS)) или пропускная способность шины памяти, байт/с; количество каналов АЦП, ЦАП и их разрядность; количество параллельных портов, количество линий в портах; количество и тип последовательных портов, протокол обмена данными; количество и тип шин расширения; количество и тип сопроцессоров; количество аппаратных каналов прерывания; наличие прямого доступа к памяти; типы и численные характеристики устройств службы времени (таймеры сторожевые, таймеры программируемые, таймеры системные); особенности сопровождающего программного обеспечения; ОТП.

Интерфейс пользователя для выбора УЧПУ выглядит в этом случае следующим образом.

1. На головной странице пользователь выбирает окно «УЧПУ». Появляется страница выбора УЧПУ с полями выбора комплектующих.

2. Выбрав поле «Компоновка», пользователь вызывает меню с полями выбора типа компоновки УЧПУ.

3. Выбрав поле «Архитектура», пользователь вызывает меню с полями выбора УЧПУ с желаемой архитектурой (определен-

ного принципа действия, структуры функций, системы команд и их формата и т. п.).

4. Выбрав поле «Редактирование программ», пользователь вызывает меню с полями выбора УЧПУ, отличающимися способом изменения управляющих программ, и так как это последнее основание деления, то автоматически вызывается страница с полями реляционной базы данных, в которые вводятся требуемые пользователем технические характеристики в форме допустимых границ, например, «Емкость ОЗУ», от 2 до 4 кбайт, или точных значений, например «Разрядность», 8 бит. В зависимости от пути выбора данной страницы в составе полей ввода параметров она может отличаться от страниц, выбор которых осуществлялся другим путем.

5. Выбрав поле «Показать», пользователь получает список подходящих марок и типов комплектующих с указанием их технических характеристик.

Работа с остальными разделами строится по сходным правилам.

Б. Средства представления информации операторам.

Б.1. Зрительные.

Б.1.1. Световые сигнализаторы.

Б.1.1.1. Сигнализаторы вызова оператора (точечные источники света: лампы накаливания, светодиоды (монохромные, цветные, с непрерывным свечением, с пульсирующим свечением, с переменным цветом свечения, с когерентным (лазерные) или некогерентным излучением, прочие)).

Б.1.1.2. Индикаторы состояния (фактом включения («горит/не горит»), типом свечения (цвет, пульсация)).

Б.1.1.3. Индикаторы уровня.

Б.1.2. Световые информаторы.

Б.1.2.1. Световые указатели (с фронтальной или торцевой подсветкой прозрачной пластинки, закрытой непрозрачным или полупрозрачным трафаретом, содержащим символическое изображение, состоящие из символов, созданных из точечных источников света; с иными конструкциями).

Б.1.2.2. Дисплеи (планшетные или строчные (сплошной сменяемой или бегущей строкой), на электронно-лучевых и плазменных панелях, на светодиодах, лепестковые, прочие).

Б.1.3. Устройства печати (принтеры различных форматов: литерные; термические; матричные, струйные, лазерные, на линейках оптических микрозатворов, на линейках из миниатюрных

светодиодных и флуоресцентных источников света; с черно-белой или цветной печатью; плоттеры (рулонные или планшетные)).

Б.1.4. Аналоговые показывающие устройства.

Б.1.4.1. Стрелочные приборы.

Б.1.4.2. Столбчатые диаграммы.

Б.1.4.3. Осциллографы.

Б.1.4.4. Прочие.

Б.1.5. Устройства представления сцен.

Б.1.5.1. Видеомониторы (на электронных лучевых трубках, на индикаторах жидкокристаллических и плазменных панелей, прочие).

Б.1.5.2. Прочие.

Б.2. Слуховые (звонки электрические, сирены (электромагнитные, пьезоэлементные), капсулы телефонные, динамики электромагнитные, стерео-системы динамиков, прочие).

Б.2.1. Звуковые сигнализаторы.

Б.2.2. Речевые.

Б.2.2.1. Речевые сигнализаторы.

Б.2.2.2. Речевые информаторы.

Б.2.2.3. Устройства речевого обмена.

Б.3. Тактильные.

Б.3.1. Вибровывозов.

Б.3.2. Отражение усилия.

Б.4. Температурные.

Б.5. Комбинированные.

Б.6. С отложенным восприятием (запись на автономные носители (дис кеты, флеш-память и т.п.)).

Параметры выбора источников световых.

Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: цвет (длина волны излучения), сила света, яркость на оси симметрии, потребность в особом фоне или подсветке, наличие световых эффектов (мигание, смена оттенков цвета и т. п.), максимальная мощность рассеяния на источнике, максимальный постоянный допустимый ток через источник, максимальный импульсный допустимый ток через источник, максимальное допустимое напряжение на источнике, максимальная допустимая температура источника, ОТП.

Параметры выбора панелей: количество эффектов, используемых при выводе информации; размер внешнего дисплея; высота отображаемого сим вола; количество одновременно отображаемых символов; угол обзора; допустимое размещение в про-

странстве; максимальный объем автономной памяти; тип интерфейса; наличие автономного питания; потребляемая мощность; параметры источников света, ОТП.

Параметры выбора устройства печати. Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: формат печати; тип бумаги (рулон или листы), количество оттенков цвета, разрешающая способность; тип шрифта, способ печати (литерный, матричный, струйный, термический, лазерный), ОТП.

Параметры выбора источников звуковых. Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: полоса частот, диапазон звукового давления или уровня звука, ОТП.

В. Сенсоры внешнего мира.

В.1. Определяющие факт присутствия и параметры перемещения объектов внешнего мира (ультразвуковые, микроволновые, тактильные, емкостные, электростатические, оптоэлектронные, на базе оптопар с открытым каналом, инфракрасные, на базе ПЗС-матриц, на базе фасетных линз, на основе иных физических эффектов).

В.2. Измеряющие интенсивность потока энергии определенного вида (электрической, тепловой, напора потока жидкости, газа и т. п., на основе иных физических эффектов).

В.3. Измеряющие температуру внешнего мира и отдельных объектов в нем (терморезистивные (резистивные детекторы, кремнерезистивные, термисторы), термоэлектрические, полупроводниковые, оптические (флуоресцентные, интерферометрические, на основе растворов, меняющих цвет от температуры), на основе иных физических эффектов).

В.4. Воспринимающие звуковые колебания (детекторы акустические, микрофоны резистивные, электростатические, оптоволоконные, пьезоэлектрические, электретные, на основе иных физических эффектов).

В.5. Измеряющие уровень радиоактивности (сцинтилляционного типа, ионизационные, на основе иных физических эффектов).

В.6. Измеряющие уровень давления в окружающей газовой или жидкой среде (ртутные, сильфонные и мембранные, пьезорезистивные, емкостные, на основе переменного магнитного сопротивления, оптоэлектронные, ионизационные, газового сопротивления, на основе иных физических эффектов).

В.7. Измеряющие влажность в окружающей среде (емкостные, резистивные, термисторные, гигрометры различные, на основе иных физических эффектов).

В.8. Определяющие запыленность среды применения.

В.9. Оценивающие загазованность среды применения.

В.10. Определяющие состав жидкостей и газов.

В.11. Измеряющие параметры световых излучений ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазонов (полупроводниковые, электровакуумные, на основе иных физических эффектов).

В.12. Определяющие химический состав вещества (реагирующие на установленное вещество или тип реакции).

В.13. Использующие наблюдатели сцен (на ПЗС-матрицах, на видеоконках, прочие).

Параметры выбора марки и типа сенсора.

Показатели назначения, выбираемые из списка, с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: диапазон измерения входной величины; предельные допустимые изменения входной величины; тип статической характеристики (линейная, нелинейная, с гистерезисом, непрерывная); основная максимальная погрешность измерения с указанием способа нормирования, %; диапазон линейности характеристик; погрешность нелинейности выходного сигнала, %; погрешность вариации выходного сигнала, %; погрешность повторяемости выходного сигнала, %; полоса пропускания, Гц; время установления выходного сигнала, с; вид выходного сигнала и его параметры; способ преобразования измеряемой величины в выходной сигнал; ОТП.

Г. Устройства ввода/вывода и предварительной обработки данных.

Г.1. Преобразователи сигналов цифровые.

Г.1.1. Преобразование аналоговых сигналов в двоичный числовой код (ДЧК) (аналого-цифровые преобразователи (АЦП)).

Г.1.1.1. С параллельным преобразованием входного сигнала.

Г.1.1.1.1. По типу адресации.

Г.1.1.1.2. По схеме программной обработки ДЧК (проверка сигнала преобразования, простое прерывание, векторное прерывание, прямой доступ к памяти).

Г.1.1.1.3. По способу пересылки ДЧК из преобразователя в цифровой приемник (в параллельных ДЧК, в последовательных ДЧК).

Г.1.1.2. С последовательным преобразованием входного сигнала (последовательного приближения, последовательного счета, в том числе следящие, интегрирующие (однотактные, многотактные, «сигма — дельта» (уравновешивающие) преобразователи, преобразователи «напряжение — частота»)).

(Далее по типу Г.1.1.1... с заменой Г.1.1.1... на Г.1.1.2...)

Г.1.1.3. Последовательно-параллельный (многотактный, многоступенчатый, конвейерный).

(Далее по типу Г.1.1.1... с заменой Г.1.1.1... на Г.1.1.3...)

Параметры выбора АЦП.

Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: количество входных аналоговых каналов, число разрядов АЦП, число комбинаций ДЧК на выходе АЦП (число уровней квантования), шаг дискретизации входного аналогового сигнала (разрешающая способность АЦП), относительное значение разрешающей способности, дискретность выходного сигнала идеальная; статическая характеристика АЦП, монотонность характеристики, верхняя граница, нижняя граница входных аналоговых сигналов, погрешность смещения нуля, погрешность полной шкалы, погрешность нелинейности, погрешность дифференциальной нелинейности, число эффективных разрядов, температурная нестабильность, предельная частота преобразования, время преобразования, время выборки, отношение сигнал/шум, коэффициент гармоник, величина опорного напряжения, дополнительные функции, ОТП.

Г.1.2. Преобразование двоичных числовых кодов ДЧК в аналоговые сигналы (цифро-цифровые преобразователи (АЦП)).

Г.1.2.1. С выходом в виде напряжения.

Г.1.2.1.1. С последовательным вводом входного кода (с широтной модуляцией, на переключаемых конденсаторах, иного типа).

Г.1.2.1.2. С параллельным вводом входного кода (с суммированием напряжения, с суммированием заряда, с суммированием токов, иного типа).

Г.1.2.2. С токовым выходом.

Г.1.2.2.1. С последовательным вводом входного кода (с широтно-импульсной модуляцией, на переключаемых конденсаторах, иного типа).



Г.1.2.2.2. С параллельным вводом входного кода (с суммированием напряжения, с суммированием заряда, с суммированием токов, иного типа).

Параметры выбора ЦАП.

Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: число ЦАП на кристалле, разрядность, быстродействие, характеристика цифро-аналогового преобразования, разрешающая способность, диапазон изменения выходного сигнала, погрешность преобразования, монополярность или биполярность выходного сигнала без дополнительного программирования, погрешность полной шкалы при отсутствии смещения нуля, погрешность смещения нуля, нелинейность, монотонность характеристики преобразования, температурная нестабильность, величина опорного напряжения, время установления выходного сигнала, скорость нарастания выходного сигнала, уровень шума на выходе ЦАП, величина выбросов (импульсных помех) в выходном сигнале, наличие особых функций ЦАП (преобразование чисел, имеющих знак, перемножение или деление сигналов, регулирование уровня выходного сигнала по цифровому входу, прямой цифровой синтез выходных сигналов), способ реализации ЦАП (одноплатный, в виде микросхемы), ОТП.

Г.2. Усилители сигналов.

Г.2.1. Операционные усилители.

Г.2.2. Усилители постоянного тока (УПТ).

Г.2.3. Усилители низкой частоты (УНЧ).

Параметры выбора усилителей.

Показатели назначения, выбираемые из списка, с учетом особенностей выбранного неделимого понятия:

- входные параметры: тип входа (дифференциальный или синфазный), диапазон допустимых входных сигналов, напряжение смещения нуля и его температурный дрейф, средний и разностный входные токи, максимальное входное дифференциальное и синфазное напряжения, входное дифференциальное и входное синфазное сопротивление;

- передаточные параметры: коэффициент усиления по напряжению, коэффициент ослабления синфазного сигнала, частота единичного усиления при единичном коэффициенте усиления;

- выходные параметры: выходное сопротивление, максимальный выходной ток, измеряемый при максимальном выходном

напряжении, максимальное выходное напряжение, величина смещения нулевого входного сигнала, уровень дрейфа напряжения смещения и/или дрейфа разности входных токов, постоянная времени усилителя, отношение «сигнал/шум», выходная мощность; частотные параметры — диапазон частот, неравномерность амплитудно-плескный коэффициент передачи для частотнозависимых устройств, коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник);

- параметры питания: напряжение питания, потребляемый ток, мощность, потребляемая в режиме покоя, коэффициент влияния отклонения питания;

- по дополнительным функциям: с изменяемым коэффициентом усиления, с преобразованием сигнала (дифференциальные, интегрирующие, масштабирующие, логарифмические, квадратичные, инвертирующие, парафазные и т. п.);

- по типу предпочтительной нагрузки: резистивная, индуктивная, емкостная, комбинированная;

- ОТП.

#### Г.2.4. Формирователи импульсов.

##### Г.2.4.1. Преобразователи исходных импульсов.

##### Г.2.4.2. Корректировщики отклонений формы импульсов.

##### Г.2.4.3. Формирователи запуска электронных схем.

##### Г.2.4.4. Формирователи импульсов энергии питания нагрузки.

Параметры выбора формирователей импульсов.

Показатели назначения, выбираемые из списка с учетом особенностей выбранного неделимого понятия: длительность, частота, амплитуда выходного сигнала, мощность выходного сигнала, коэффициент формы, входное сопротивление, выходное сопротивление, порог срабатывания, потребляемая мощность, принцип действия (на триггерах, на компараторах, на элементах логики, на ждущих мультивибраторах, на электронных ключах), ОТП.

#### Г.3. Модуляторы сигналов.

##### Г.3.1. Применяемые в каналах передачи сигналов различного типа (в проводных линиях, в световодных линиях, в радиоканалах, в акустических каналах и т. п.).

##### Г.3.2. Применяемые как способ управления исполнительным устройством.