

КИБ

ХАРЬКОВСКОЕ  
ВЫСШЕЕ КОМАНДНО-ИНЖЕНЕРНОЕ УЧИЛИЩЕ

---

И. В. КУЗЬМИН

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

**Часть III**

**ОПЕРАТОР В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ**

Харьков  
1970

681.52.  
К 89

ХАРЬКОВСКОЕ  
ВЫСШЕЕ КОМАНДНО-ИНЖЕНЕРНОЕ УЧИЛИЩЕ

---

И. В. КУЗЬМИН

ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ  
ТЕЛЕМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Часть III

ОПЕРАТОР В СИСТЕМЕ КОНТРОЛЯ  
И УПРАВЛЕНИЯ

*Утверждено начальником училища  
в качестве учебного пособия  
для слушателей ХВКИУ*

Харьков  
1970

681.52 + 621.398

УДК 002.6

Проектирование автоматизированных телемеханических систем контроля и управления, часть III, Оператор в системе контроля и управления, И. В. Кузьмин, ХВКИУ, 1970.

В пособии кратко изложены основы «согласования» человека с системой контроля и управления. Описаны основные характеристики анализаторов человека, рассмотрены методы оценки эффективности приема, передачи и хранения информации человеком, а также системы подготовки операторов.

Книга является пособием по части курса «Проектирование автоматизированных телемеханических систем контроля и управления».

Иллюстраций — 55, таблиц — 13, библиография — 16 наименований.

Отв. редактор  
И. Г. ВАСИЛЬЕВ

## ВВЕДЕНИЕ

Инженерная психология изучает психофизические характеристики человека, определяющие эффективность его взаимодействия с машиной. К этим характеристикам относятся:

- быстрота реакции операторов на звуковые, световые и другие воздействия;
- способность человека принимать, перерабатывать и хранить информацию;
- надежность операторов;
- характеристика психофизических процессов и структура трудовых действий.

Перечисленные основные характеристики позволяют правильно выбирать принципы построения индикаторных устройств и органов управления в системах контроля и управления (СКУ), решать проблему согласования конструктивных особенностей машин с характеристиками человека, управляющего ими, в конечном итоге решать проблему «человек — машина».

Проблема «человек — машина» является одной из основных проблем современной науки и, в частности кибернетики. Ее решение предполагает совместную работу инженеров, математиков, физиологов, анатомов и представителей многих других научных дисциплин, так как по своему существу эта проблема требует комплексного исследования.

Проблема «человек — машина» в свою очередь может быть подразделена на основные подпроблемы:

- человек как звено системы контроля и управления;
- анализаторы человека (чувствующие приборы);
- способность человека принимать, передавать и хранить информацию;
- психофизические процессы и передача информации человеку;
- психофизическое исследование средств сигнализации;
- моторные компоненты действия и конструирование органов управления.

Одним из основоположников формулировки и изучения этих проблем и подпроблем в Советском Союзе следует считать Б. Ф. Ломова, монография которого [1] послужила основой для написания настоящего учебного пособия. Главы I, II, IV являются конспективным изложением указанной монографии, главы III, V — в значительной степени являются оригинальными, посвященными изложению информационных моделей и принципов построения тренажеров операторов.

Автор выражает сердечную благодарность сотрудникам кафедры И. Г. Васильева и лично И. Г. Васильеву, В. И. Нилову за высказанные замечания при рецензировании и редактировании, направленные на улучшение пособия.

При написании пособия не ставилась задача изложения всех аспектов инженерной психологии, как это сделано в пособиях [13], [14]. Материал здесь изложен в соответствии с программой курса «Проектирование автоматизированных телемеханических систем контроля и управления».

---

## ГЛАВА I

# ЧЕЛОВЕК КАК ЗВЕНО СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

### § 1. СТРУКТУРА СИСТЕМ «ЧЕЛОВЕК — МАШИНА»

Основным объектом исследования инженерной психологии является система «человек — машина», которая рассматривается как частный случай систем контроля и управления, а человек-оператор — как одно из звеньев этих систем. Однако всегда человек, преобразуя природу, осуществляет сознательно поставленную цель, машина является всего лишь «слепым исполнителем» человеческой воли, орудием его труда.

Рассмотрим в общих чертах наиболее типичные разомкнутые и замкнутые СКУ (рис. 1, 2, 3), в которых человек, связанный пря-

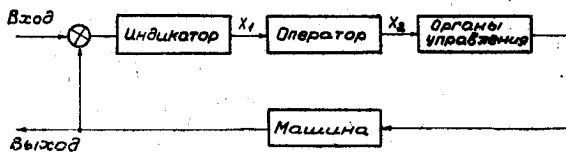


Рис. 1.

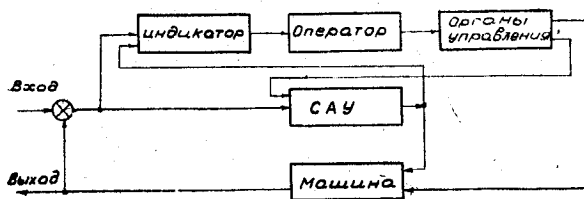


Рис. 2.

мыми и обратными связями с управляемым объектом, выступает в роли важнейшего и наиболее ответственного звена системы.

На рис. 1 представлена элементарная структурная одноконтурная схема замкнутой системы «человек — машина». В этой схеме состояние любого звена влияет на все остальные и зависит от них.

На рис. 2 представлена более сложная структурная схема «человек — машина», в которую включается система автоматического управления (САУ), а человек-оператор наблюдает за индикатором и в случае, когда САУ по каким-либо причинам не справляется с задачей, оператор активно вмешивается в процесс управления.

На рис. 3 представлена структурная схема с управляющей вычислительной машиной (УВМ), которая осуществляет автомати-

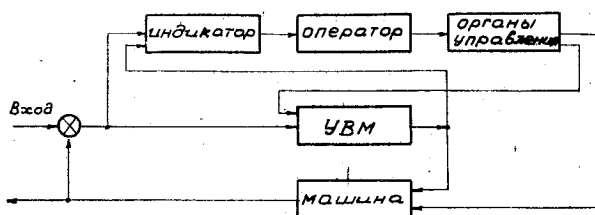


Рис. 3.

ческий пуск управляемых объектов по оптимальной программе с учетом их состояний, поддерживает заданный режим работы, исходя из максимальной экономичности, предупреждает аварии, сигнализирует о нарушениях процесса с указанием места их возникновения и т. д., освобождая тем самым человека-оператора от многих функций. При нормальной работе человек наблюдает за работой машины, при отказе УВМ человек берет функции контроля и управления на себя.

Из рассмотрения структурных схем систем контроля и управления очевидно, что при переходе от одного этапа развития к другому человек освобождается от ряда функций, которые передаются машинам, беря на себя более ответственные задачи по интервальному контролю и управлению процессом.

Человек в системах «человек — машина» может выполнять различные функции:

- выступать в роли приемника осведомительной информации, поступающей в той или иной форме от управляемого объекта, ее ретранслятора, передающего информацию от одного звена системы к другому;

- осуществлять анализ информации и принимать решения, т. е. вырабатывать управляющую или командную информацию;

- осуществлять программирование работы всей системы или ее частей;

- вести наблюдение и контроль за работой системы;

- выступать в роли исполнителя команды.

Обычно человек совмещает ряд функций, выполняет их последовательно или одновременно. На разных этапах процесса контроля и управления одни функции могут быть доминирующими, а другие подчиненными.

Прием и переработка человеком информации, циркулирующей в системах контроля и управления, выступают как частный случай процессов познания и деятельности, протекающих с определенными характеристиками.

- К этим характеристикам в первую очередь следует отнести:
- время задержки;
  - точность;
  - надежность.

## § 2. ВРЕМЯ ЦИКЛА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Время цикла контроля и управления в простейшей одноконтурной системе представляет собой сумму времени задержки сигнала во всех звеньях:

$$T = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (1)$$

где  $t_i$  — время задержки сигнала в  $i$ -м звене;

$n$  — количество звеньев в системе контроля и управления.

Наименьшим быстродействием в системах управления обладает человек: время его реакции исчисляется десятками долями секунды. Поэтому общее время контроля и управления определяется в основном временем реакции человека.

Самой элементарной разновидностью реакций является так называемая простая сенсомоторная реакция (нажатие кнопки, перемещение рычага и т. п.) в ответ на заранее известный, но внезапно появляющийся сигнал с возможной для него максимальной скоростью.

Время задержки в этом случае складывается из латентного периода реакции, определяемого временем от момента появления сигнала до начала движения, и моторного компонента, определяемого длительностью ответного движения.

Латентный период простой сенсомоторной реакции зависит прежде всего от того, на какой анализатор воздействует сигнал-раздражитель, или, иначе говоря, от модальности ощущения, регулирующего ответное движение.



В таблице 1 приводятся сводные данные о латентном периоде. Таким образом, модальность сигнала весьма сильно влияет на латентный период.

Т а б л и ц а 1

Сводные данные о латентном периоде

Анализатор (качество сигнала раздражителя)	Латентный период (средняя величина, msec)	
Тактильный (прикосновение) . . . . .	90 — 220	
Слуховой (звук) . . . . .	120 — 180	
Зрительный (свет) . . . . .	150 — 220	
Обонятельный (запах) . . . . .	310 — 390	
Температурный (тепло и холод) . . . . .	280 — 1600	
Вкусовой {	соленое . . . . .	310
	сладкое . . . . .	450
	кислое . . . . .	540
	горькое . . . . .	1080
Вестибулярный аппарат (вращение) . . . . .	400	
Болевой . . . . .	130 — 890	

Латентный период сильно зависит от интенсивности сигнала. Чем сильнее сигнал, тем короче латентный период.

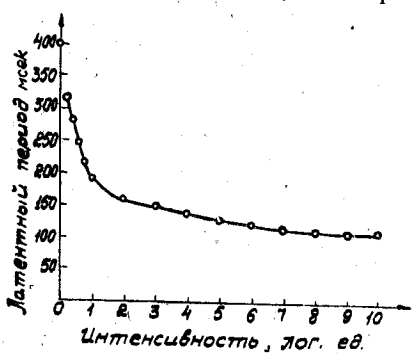


Рис. 4

На рис. 4 приведены данные измерения латентного периода реакции от интенсивности звукового раздражителя, близкой к порогу чувствительности слухового анализатора до 100 дБ и выше.

Зависимость времени реакции от интенсивности силы раздражителя может быть определена по формуле

$$t_p = \frac{a}{i^n} + k, \quad (2)$$

где  $a$  — переменная часть времени реакции;

$k$  — несократимый минимум, т. е. минимальное время реакции в оптимальных условиях;

$i^n$  — интенсивность раздражителя;

$n$  — постоянная, зависящая от характеристик сигналов и условий опытов.

Латентный период реакции зависит также от пространственного положения и величины раздражителя, а также от фона, на котором он действует. На рис. 5 приведена зависимость латентного периода от места воздействия светового раздражителя: 1 — фовеа (латентный период принята за 0); 2 — внутренняя (носовая) часть поля зрения; 3 — наружная (височная) часть поля зрения.

Реакция на прекращение действия света короче, чем на его появление примерно на 13,5%.

Реакция на увеличение интенсивности света имеет больший латентный период, чем на уменьшение.

Реакция на ускорение примерно на 15% короче, чем на замедление движения светового пятна.

Важной для практики является дизъюнктивная реакция (реак-

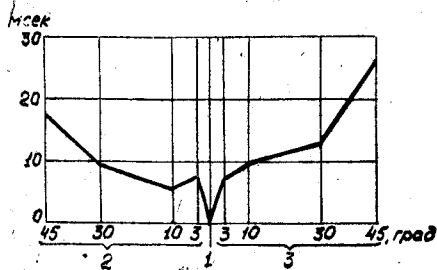


Рис. 5.

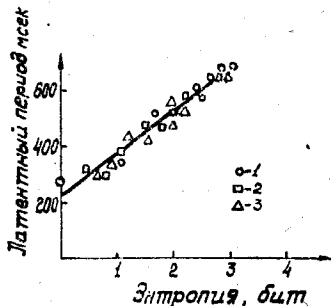


Рис. 6.

ция выбора) — реакция, связанная с дачей ответа известным движением на каждый из заранее известных сигналов.

Латентный период дизъюнктивной реакции (рис. 6) пропорционален логарифму альтернативных стимулов при равной вероятности их появления:

$$t_p = a + b H_1, \quad (3)$$

где

$t_p$  — время реакции;  
 $a, b$  — константы;

$$H_1 = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \text{ — средняя информация на стимул.}$$

Эта формула справедлива при простых средних сенсомоторных реакциях.

На рис. 6: 1 — равновероятные стимулы; 2 — неравновероятные стимулы; 3 — изменялась условная вероятность.

Кроме перечисленных, существуют также другие сенсомоторные реакции: серийные, дозировочные, прослеживающие, реакции с переключением.

В процессе упражнений латентный период сенсомоторных реакций сокращается и стабилизируется (рис. 7).

Зависимость времени двигательной реакции от величины угла наклона оператора относительно горизонтали при постоянной на-

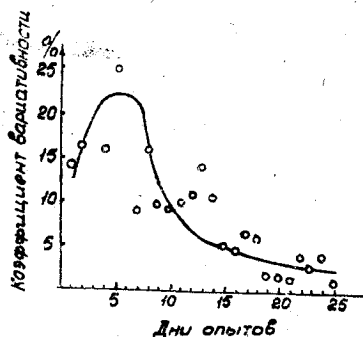


Рис. 7.

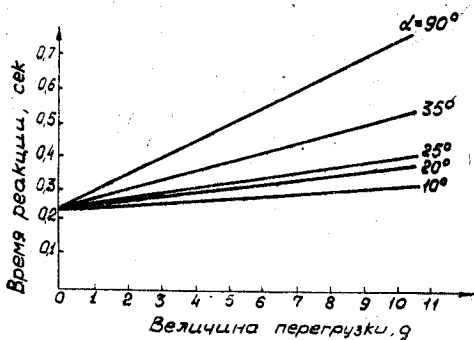


Рис. 8.

грузке может быть представлена графически (рис. 8) и аналитически:

$$t_p = 0,21 + n(0,05 + 0,033 \alpha), \quad (4)$$

где  $n$  — величина перегрузки в единицах  $g$ ;

$\alpha$  — угол наклона кресла оператора относительно горизонтали,  $рад$ .

На латентный период реакции влияет также конструкция сигнальных устройств, органов управления и организация условий работы.

Зависимость времени получения и переработки информации человеком от ее количества определяется формулой

$$\tau = 0,03 H, \quad (5)$$

где  $H$  — количество информации, перерабатываемой оператором

### § 3. ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА

Точность работы оператора определяется в основном ошибками, которые он допускает в процессе управления. Все ошибки оператора можно разделить на систематические и переменные.

Систематическая ошибка есть различие между средним значением большой серии измерений и истинной или ожидаемой величиной.

Систематическая ошибка есть среднее арифметическое от всех допущенных ошибок (включая нулевые) с учетом знака

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N e_i}{N}, \quad (6)$$

где  $\sum e_i$  — сумма ошибок;

$N$  — число испытаний.

Систематические ошибки можно устранить калибровкой, градуировкой приборов и другими конструктивными мерами в соответствии с индивидуальными особенностями операторов.

Для характеристики переменных ошибок обычно используют среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \varepsilon)^2}{N - 1}}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon$  — систематическая средняя ошибка;

$e_i$  — величина каждой отдельной ошибки.

Ожидаемая переменная ошибка работы системы «человек — машина»

$$\sigma_{en} = \sqrt{\sigma_{ea}^2 + \sigma_{eb}^2 + \dots + \sigma_{en}^2}, \quad (8)$$

где  $\sigma_{ej}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) — переменная ошибка компонентов системы.

Общая ошибка системы «человек — машина»

$$\sigma_{en}' = \sqrt{(\sigma_{ea}^2 + \sigma_{eb}^2 + \dots + \sigma_{en}^2) + (\varepsilon_{ea} + \varepsilon_{eb} + \dots + \varepsilon_{en})^2}. \quad (9)$$

Ошибки оператора зависят от скорости течения процесса, условий работы оператора, темпа работы, функционального состояния нервной системы, индивидуальных особенностей оператора, его обученности и т. д.

На рис. 9 приведен график изменения точности работы оператора в зависимости от тренировки, причем: 1 — при темпе 75 сигналов в минуту; 2 — при темпе 95 сигналов в минуту; 3 — при темпе 120 сигналов в минуту.

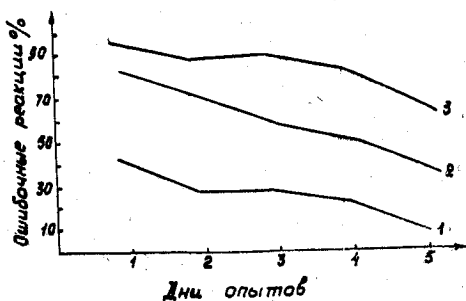


Рис. 9.

Ошибки оператора могут быть значительно уменьшены применением дублирования операторов.

Вероятность передачи ошибочного сообщения двумя операторами

$$P_e = \sum_{j=1}^N \left[ p_j \sum_{i=1}^n (p_{eji} \cdot p_{eji}') \right], \quad (10)$$

где  $p_{eji}$  — вероятность того, что оператор  $A$  сделает ошибку типа  $i$  при выполнении операции  $j$ ;

$p_{eji}'$  — вероятность того, что оператор  $B$  сделает ошибку типа  $i$  при выполнении операции  $j$ ;

$p_j$  — доля времени, которая необходима для выполнения операции  $j$ .

Ошибку оператора также можно значительно уменьшить включением дополнительных контуров, обеспечивающих оператора информацией об его управляющих действиях.

На рис. 10 приведена схема системы управления с дополнительными контурами, где 1 — индикатор; 2 — оператор; 3 — органы управления; 4 — машина; 5 — обратная связь.

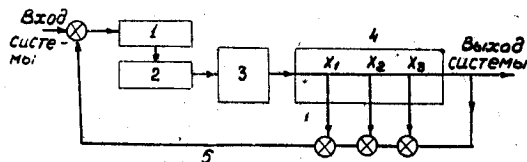


Рис. 10.

Иногда с практической точки зрения точность работы оператора удобно характеризовать ошибками первого и второго рода.

Например, при работе в системе контроля и управления вероятность пропуска отказов и обнаружения ложного отказа при принятии решения оператором об исправности одномерной системы могут быть определены по формулам [2]:

$$P_{\text{но}} = \int_{-\infty}^a f(x) \left[ \int_{a-x}^{b-x} f(e) de \right] dx + \int_b^{\infty} f(x) \left[ \int_{a-x}^{b-x} f(e) de \right] dx, \quad (11)$$

$$P_{\text{ло}} = \int_a^b f(x) \left[ \int_{-\infty}^{a-x} f(e) de + \int_{b-x}^{\infty} f(e) de \right] dx, \quad (12)$$

где  $f(x)$  — закон распределения вероятности выходной координаты системы  $x$ ;

$f(e)$  — закон распределения ошибок оператора;

$a, b$  — допустимые значения выходной координаты системы.

## § 4. НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ОПЕРАТОРА

Под надежностью понимается вероятность того, что система или ее элемент выполняет поставленную перед ними задачу в заданный интервал времени при заданных условиях.

При последовательном соединении элементов системы ее надежность определяется по формуле [3]

$$P = \prod_{j=1}^n p_j, \quad (13)$$

где  $p_j$  — надежность каждого элемента системы.

Одним из самых простых средств повышения надежности является дублирование наиболее ненадежных элементов. Надежность работы двух равнонадежных параллельно включенных элементов равна

$$P = 1 - (1 - p)^2, \quad (14)$$

где  $p$  — надежность работы одного элемента.

Кроме того, надежность системы можно повысить контролем ее элементов с последующим восстановлением.

Наименьшей надежностью системы «человек — машина» обладает оператор. В таблице 2 приведены данные по отказу различных систем по вине оператора.

Т а б л и ц а 2

Данные по отказу различных систем по вине оператора [1]

№ пп.	Наименование системы	Отказ по вине операторов, %
1	Международная организация ГВФ . . . . .	50
2	Ракетные системы . . . . .	20 ÷ 50
3	В энергосистемах . . . . .	20 ÷ 30

Надежность работы оператора, точно так же как быстрдействие и точность, зависит от множества факторов и в настоящее время недостаточно изучена.

Некоторое повышение надежности работы оператора можно достигнуть, если информацию управления передавать одновременно по нескольким каналам, например слуховому и световому.

Значительное влияние на надежность работы оператора оказывают помехи.

Шум оказывает заметное влияние на внимание человека (рис. 11).

На этом рисунке приняты обозначения: 1 — до воздействия шумов; 2 — сразу после воздействия; 3 — через 30 мин после воздействия; 4 — через 60 мин; 5 — через 120 мин; а — до воздействия шумов; интенсивность шума: 60 дБ (б); 70 дБ (в); 80 дБ (г); 90 дБ (д); 100 дБ (е).

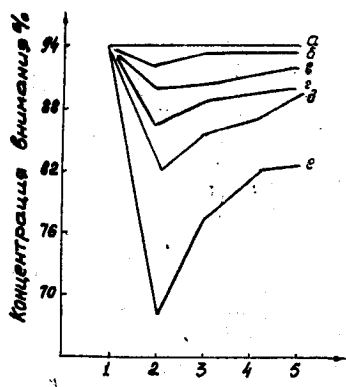


Рис. 11.

Помехами, аналогичными шуму, являются также вибрация; высокая температура, избыточная или недостаточная освещенность рабочего места и т. д.

С учетом всевозможных факторов в изменениях соотношений между продуктивностью, работоспособностью и эмоционально-волевым напряжением можно наметить семь периодов.

#### 1. Период вработываемости.

Увеличивается уровень максимальной

работоспособности, нарастает продуктивность.

2. Период оптимальной работоспособности. Уровень максимальной работоспособности, продуктивности и волевого усилия относительно стабилизированы.

3. Период «полной компенсации». Утомление несколько снижает уровень максимальной работоспособности, однако благодаря эмоционально-волевому напряжению продуктивность сохраняется на прежнем уровне.

4. Период «неустойчивой компенсации». С нарастанием утомления максимальная работоспособность продолжает снижаться. Интенсивность волевого напряжения колеблется. В момент его ослабления продуктивность падает, в момент усиления — возрастает.

5. «Конечный порыв». Утомление все более нарастает, а максимальный уровень работоспособности падает. Однако продуктивность может быть увеличена при значительном волевом усилии.

6. Период прогрессивного снижения продуктивности. Однако уровень максимальных возможностей лежит выше уровня продуктивности.

7. Прекращение работы. Рабочая доминанта угасает; возбуждение сменяется вялостью.

Наиболее высокая эффективность и надежность деятельности человека проявляются при оптимальной зоне условий, характеризующейся следующими признаками:

— наиболее высокое проявление функций работающей системы (двигательной, сенсорной и др.), например, наибольшая точность различения, наибольшая скорость реакции и т. д.;

— длительное сохранение работоспособности системы, т. е. выносливость. Оптимальный темп подачи информации;

— наиболее короткий период вработываемости, т. е. период перехода от состояния покоя к состоянию высокой работоспособности;

— наименьшая вариативность результатов работы;

— адекватность реакций внешним воздействиям;

— наибольшая согласованность в работе компонентов системы.

Задача оптимизации условий деятельности оператора сводится практически к задаче согласования характеристик технических устройств с характеристиками и особенностями человека-оператора.



## ГЛАВА II

### АНАЛИЗАТОРЫ ЧЕЛОВЕКА

Одной из основных связей человека и машины в системах управления и контроля является связь «индикатор — анализатор». При этой связи осуществляется передача информации от машины к человеку.

Для того чтобы сигнал, несущий информацию о состоянии управляемого объекта, был принят человеком, его необходимо преобразовать в такую физическую форму, которая могла бы быть отображена в человеческих ощущениях.

При разработке индикаторов первоочередным является вопрос о выборе физического алфавита сигнала. В качестве такого алфавита могут быть использованы оптические, акустические и некоторые другие материальные процессы и их свойства. Выбор алфавита из возможных определяется полнотой описания регулируемого или контролируемого процесса и отношением анализатора к алфавиту.

В таблице 3 представлены физические процессы и их основные характеристики, при которых процессы воспринимаются и не воспринимаются человеком.

Т а б л и ц а 3

#### Физические процессы и их основные характеристики

Наименование процесса	Воспринимается человеком	Не воспринимается человеком
Электромагнитные колебания	Видимый спектр 380 — 400 до 750 — 780 мик	$10^{-13}$ до $10^7$ см
Звуковые волны	Слышимый спектр от 16 — 20 до 20 000 — 22 000 гц	
Звуковые волны	Меньше 15 гц создают ощущения	

## § 1. АНАЛИЗАТОР, ЕГО СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИИ

Любой анализатор состоит из трех главных частей (рис. 12):

- рецептора (З, С, М);
- проводящих нервных путей (Мк);
- мозгового конца или центра в коре больших полушарий головного мозга.

*Рецептор* превращает энергию раздражителя в нервный процесс. Условием превращения является физическое взаимодействие рецептора с предметом-раздражителем.

Вход рецепторов приспособлен к приему только определенных видов воздействия, но его выход посылает сигналы, по своей природе единые для любого входа и выхода нервной системы. Это позволяет рассматривать рецепторы как устройства кодирования информации. По своему характеру «нервный код» у высших животных и человека является частотно-импульсным.

*Проводящие нервные пути* осуществляют передачу нервных импульсов в кору головного мозга.

Мозговой конец анализатора состоит из ядра и рассеянных по коре головного мозга элементов. Ядро, образованное массой нервных клеток, находится в той области коры головного мозга, куда входят проводящие пути от рецепторов. Ядро зрительного анализатора расположено в затылочных долях, слухового — в височных, кожно-механического — в области задней центральной извилины и т. д. Рассеянные элементы каждого анализатора находятся за пределами его ядра; они входят в области, смежные с ядрами других анализаторов. Мозговые концы разных анализаторов переслаиваются. Ядра анализаторов осуществляют самый тонкий и высший анализ внешних воздействий. При разрушении ядра зрительного анализатора теряется предметное зрение, при разрушении слухового не различаются сложные сочетания звуков. Однако

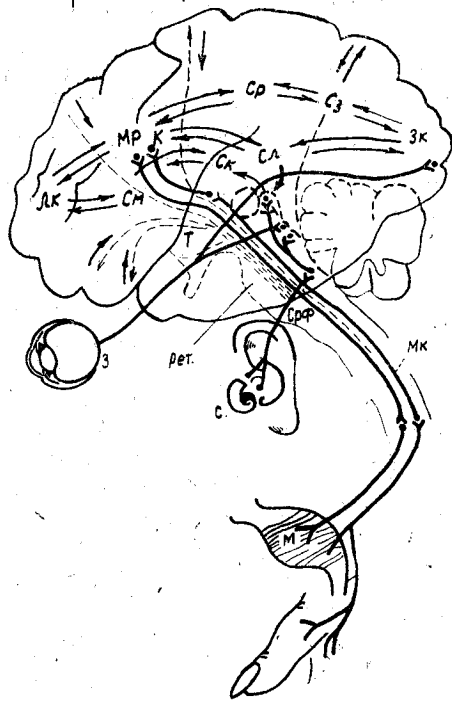


Рис. 12.

в области задней центральной извилины и т. д. Рассеянные элементы каждого анализатора находятся за пределами его ядра; они входят в области, смежные с ядрами других анализаторов. Мозговые концы разных анализаторов переслаиваются. Ядра анализаторов осуществляют самый тонкий и высший анализ внешних воздействий. При разрушении ядра зрительного анализатора теряется предметное зрение, при разрушении слухового не различаются сложные сочетания звуков. Однако

способность различения света и отдельных звуков в этих случаях сохраняется за счет функционирования рассеянных элементов.

Связь между рецепторами и мозговым концом анализаторов является двусторонней, а анализатор вследствие этого представляет собой систему, включающую прямые и обратные связи, что обеспечивает его саморегуляцию.

Нервные импульсы, достигнув коры головного мозга, подвергаются определенной обработке и снова возвращаются в рецепторы. Можно полагать, что кольцевой механизм интимно связан с формированием психического изображения (ощущения и восприятия). Это формирование, являясь эффектом внутрианализаторного рефлекса, представляет собой декодирование нервных импульсов. Рецептор, таким образом, выполняет функции не только кодирования, но и декодирования, являющегося необходимым условием построения предметного изображения.

Характерной особенностью анализаторов является парность одноименных органов чувства (бирецепция).

Парность анализаторов является одним из условий, обеспечивающих высокую надежность работы анализаторов. Взаимодействие полушарий головного мозга является механизмом сличения дублированных сигналов и обеспечивает борьбу с помехами. Кроме того, каждая пара рецепторов принимает и передает в мозговой конец массу недублированных сигналов, позволяющих получить новую информацию, недоступную каждой из них в отдельности, т. е. повышает тем самым «пропускную способность», и позволяет решить задачу пространственного распознавания.

Важную роль в отражении пространственных свойств предметов играет функциональная асимметрия, заключающаяся в том, что одна из сторон является ведущей, доминирующей относительно какой-то, определенного свойства.

Условно рефлекторная природа функциональной асимметрии свидетельствует о неразрывности основных нервных механизмов: механизма анализатора и механизма временных связей.

## § 2. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗАТОРОВ

Основной характеристикой анализаторов является чувствительность.

Чувствительность определяется двумя величинами:

— отрезком континуума стимулов, воздействие которых вызывает ощущения данной модальности;

— дифференциальным порогом, или порогом различения.

Не всякий раздражитель вызывает ощущение. Кроме того, существует минимальная и максимальная интенсивность раздражителя, при которых анализатор чувствует.

Интервал от минимальной до максимальной адекватно ощущаемой величины определяет диапазон чувствительности анализатора.

Минимальная величина раздражителя, вызывающая едва заметное ощущение, называется нижним абсолютным порогом чувствительности, максимальная — верхним абсолютным порогом чувствительности. По нижнему порогу чувствительности судят об абсолютной чувствительности анализатора к интенсивности раздражителя.

Абсолютная чувствительность

$$E = \frac{1}{I}, \quad (15)$$

где  $I$  — пороговая величина раздражителя.

Дифференциальный порог определяется минимальным различием между двумя раздражителями, которое вызывает едва заметное различие ощущений.

Вебер предложил закон

$$\frac{\Delta I}{I} = k, \quad (16)$$

где  $\Delta I$  — величина приращения интенсивности стимула, соответствующая минимальному различению;

$I$  — величина исходного стимула;

$k$  — константа.

Закон Вебера справедлив для средней части всего континуума стимулов, вызывающих ощущения данной модальности.

Соотношение интенсивности ощущения с интенсивностью раздражителя выражается либо приближенным психофизическим законом Фехнера

$$E = K \lg I + c, \quad (17)$$

где  $c$  — константа, либо более точным психофизическим законом Стивенса

$$f = k (I - I_0)^n, \quad (18)$$

где  $f$  — субъективная величина ощущения;

$I$  — интенсивность стимула;

$I_0$  — абсолютный порог, действующий в данных условиях;

$k$  — константа;

$n$  — показатель степени.

Значение абсолютного порога чувствительности изменяется в зависимости от адаптации и маскировки.

Закон Стивенса позволяет при определении интенсивности ощущения учитывать не только величину раздражителя, но и функциональное состояние анализатора.

Дифференциальный порог сильно зависит от скорости изменения интенсивности раздражителя. Вальтером был введен динамический дифференциальный порог чувствительности

$$k' = k_T \left( 1 + \frac{v_0}{v_1 - v_0} \right), \quad (19)$$

где  $k_T$  — величина статического порога, оцениваемая по едва ощущаемому различию изменения интенсивности, происходящего за бесконечно малый интервал времени;

$v_1$  — скорость изменения интенсивности раздражителя в данных условиях;

$v_0$  — пороговая скорость изменения интенсивности.

Итак, если абсолютные пороги определяют общую длину «шкалы анализаторов», то дифференциальный порог — величину ее делений или разрешающую способность.

Кроме указанных порогов существуют также временной, пространственный и оперативный.

Временной порог измеряется длительностью воздействия, необходимой для возникновения ощущения. Его величина определяется в основном временем, необходимым для приема сигнала и его циркуляции в рефлекторном кольце анализатора.

Пространственный порог определяется по минимальным размерам едва ощущаемого раздражителя, его расстоянию от рецептора, положению в сенсорном поле и той площади рецепторной поверхности, на которую воздействует раздражитель.

Необходимо отметить, что временные и пространственные параметры процессов ощущения выступают в единстве.

Оперативный или оптимальный порог определяется наименьшей величиной интервала различения (дивергенции), при которой скорость и точность различения достигают максимума.

На рис. 13 приведен график изменения скорости приема и переработки информации в зависимости от величины различения

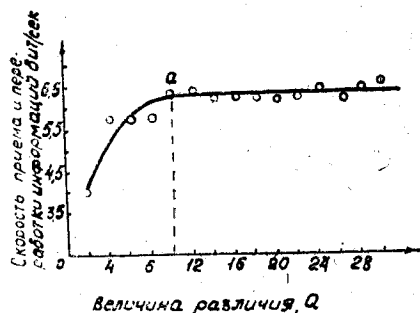


Рис. 13.

Ближайшей задачей является исследование порогов оптимального различения для многомерных стимулов.

Анализатор является самонастраивающейся системой. Одной из характерных особенностей работы этой системы является адап-

$$Q = \frac{n}{\Delta I}, \quad (20)$$

где  $n$  — интервал различения признака;

$\Delta I$  — дифференциальный порог чувствительности;

$a$  — оперативный порог.

Ближайшей задачей является исследование порогов оптимального различения для многомерных стимулов.

тация, т. е. регулировка диапазона чувствительности в соответствии с условиями деятельности анализаторов. Известно, что на входе рецепторов интенсивность сигналов может изменяться примерно в  $10^{10}$  раз. На выходе нервных волокон может воспроизводиться только до 28 ступеней интенсивности.

Адаптация характеризуется величиной изменения чувствительности и временем, в течение которого она осуществляется. Для разных анализаторов эти показатели различны: в зрительном анализаторе чувствительность может изменяться в  $2 \times 10^8$  раз за несколько десятков минут (рис. 14).

На этом рисунке показана адаптация: ТК — к темно-красному цвету; КО — к красно-оранжевому; Ж — к желтому, З — к зеленому; Б — к белому; Ф — к фиолетовому.

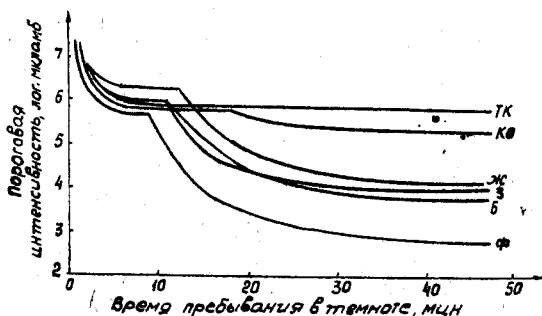


Рис. 14.

Как видно, вначале чувствительность возрастает быстро, примерно на 10-й минуте отмечается замедление адаптации; затем — вновь быстрый рост чувствительности, который становится все более медленным. Временная задержка адаптации обусловлена перестройкой механизма зрения: переключением от дневного (колбочкового) зрения к сумеречному (палочковому).

Важную роль в настройке анализатора играет также проприо-мускулярный аппарат, изменяющий положение рецептора таким образом, чтобы получить оптимальную чувствительность.

Таким образом, чувствительность анализатора является динамической характеристикой; ее диапазон изменяется с изменением действующего раздражителя.

### § 3. ИЗБИРАТЕЛЬНОСТЬ АНАЛИЗАТОРА

Избирательность, являясь условием формирования адекватных ощущений, выступает также как средство борьбы с помехами, обеспечивая тем самым высокую помехоустойчивость анализатора.

Различают амплитудную, пространственную, вероятностную и временную избирательность.

Амплитудная избирательность — способность различать раздражители различной интенсивности.

Пространственная избирательность — способность выделять раздражитель на фоне других.

Вероятностная избирательность — избирательность при дублировании сигналов.

Временная избирательность — способность анализатора обеспечивать оптимальную чувствительность в определенные моменты времени.

Способы повышения помехозащищенности, сложившиеся в ходе эволюции, выступают в неразрывном единстве. Они являются одним из оснований высокой надежности работы анализаторов.

#### **§ 4. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИГНАЛАМ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

Рассмотренные характеристики и устройство анализаторов позволяют сформулировать основные требования к сигналам (раздражителям).

Интенсивность сигналов должна соответствовать «среднему участку шкалы анализатора» — наиболее крутой части характеристики чувствительности.

Для того чтобы оператор смог следить за изменением интенсивности сигналов, сравнивать их между собой по интенсивности, длительности и т. д. необходимо обеспечить разницу между сигналами или ступенями их изменения на величину, превышающую дифференциальный порог чувствительности. Однако перепады не должны быть большими, так как при больших перепадах возникает утомление. Следовательно, существует не только оптимальные пороги, но и оптимальные зоны, в которых различение сигналов осуществляется с наибольшей скоростью и точностью. Все это справедливо не только относительно интенсивности, но и относительно размеров и длительности сигналов.

Общая длина физического алфавита сигналов, с которыми должен работать оператор, определяется числом различных состояний сигналов и возможностью их относительной оценки.

Особенно важно правильно расположить индикаторы относительно органов чувств. Наиболее важные и ответственные сигналы должны находиться в тех зонах сенсорного поля, которое соответствует участкам с наиболее высокой чувствительностью.

Организация сенсорного поля оператора должна иметь в виду динамику изменения чувствительности анализатора в процессе работы и обеспечить условия для амплитудной, вероятностной, временной и пространственной избирательности работы анализаторов.

При конструировании индикаторных устройств необходимо также выбрать качество сигналов, следовательно, модальность анализатора.

## § 5. ЗРЕНИЕ

Зрительная система — комплекс чувствительных и настроечных аппаратов, предназначенных для адекватного отражения оптических стимулов. Основой этой системы являются оптический анализатор, обладающий чувствительностью к лучистой энергии и окуломоторный аппарат, обеспечивающий перемещение глаза. Перемещение глаза порождает кинестетические (двигательные) ощущения, играющие важную роль в зрительном восприятии пространства.

Периферическая часть оптического анализатора включает два типа рецепторов: палочки и колбочки. Палочки являются аппаратом ахроматического зрения, колбочки — хроматического.

На рис. 15 приведена общая длина «шкалы» чувствительности оптического анализатора. Здесь приняты обозначения: ДЗ — днев-

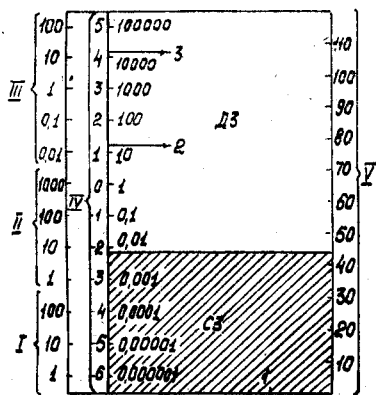


Рис. 15.

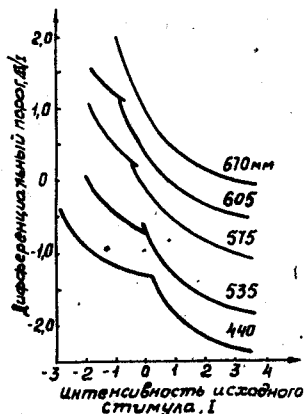


Рис. 16.

ное зрение; СЗ — сумеречное зрение; 1 — нижний абсолютный порог; 2 — белая бумага; 3 — верхний абсолютный порог.

Дифференциальный порог в среднем равен 0,01 исходной интенсивности стимула. С увеличением интенсивности исходного стимула дифференциальный порог уменьшается. Его величина также зависит от длины волны: чем длиннее волна, тем выше порог (рис. 16).

При хроматическом колбочковом зрении глаз различает семь цветов и более сотни их оттенков.



С изменением длины волны изменяется качество ощущения (табл. 4).

Таблица 4

Изменение качества ощущения с изменением длины волны

Ц в е т	Длина волны, ммк
Фиолетовый . . . . .	380 — 455
Синий . . . . .	455 — 470
Голубой . . . . .	470 — 500
Зеленый . . . . .	500 — 540
Желтый . . . . .	540 — 590
Оранжевый . . . . .	590 — 610
Красный . . . . .	610 — 780

Переход от цвета к цвету является плавным. По последним научным данным диапазон обнаружения световых сигналов охватывает длины волн от 300 до 1050 ммк.

С уменьшением интенсивности цветовой тон теряет выраженность и при очень малой интенсивности сигнал становится ахроматическим.

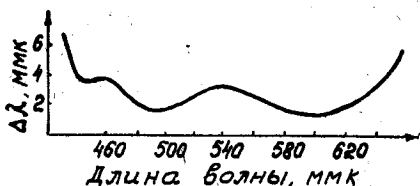


Рис. 17.

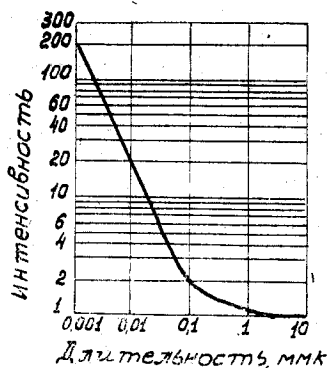


Рис. 18.

Дифференциальный порог цветовой чувствительности весьма мал (рис. 17).

Временной порог чувствительности зависит от интенсивности одиночной вспышки света: чем больше вспышка, тем меньше порог, и наоборот (рис. 18).

Временной параметр чувствительности оптического аппарата характеризуется также критической частотой мелькания, определяющей границу прерывистого и непрерывного стимула. Критическая частота мелькания зависит от интенсивности светового воздействия (рис. 19); с увеличением интенсивности она увеличивается.

К временному параметру зрительных ощущений относится длительность инерции зрения, измеряемая от 0,05 до 1 сек и зависящая от качества оптического раздражителя. За время инерции осуществляется усреднение световых воздействий на сетчатку, необходимое для выделения полезного сигнала из шума, в том числе и шума, обусловленного флюктуацией квантования.

При конструировании аппаратуры возникает необходимость, чтобы человек не замечал или наоборот замечал прерывности световых сигналов. В соответствии с этим надо выбирать частоту мелькания. В телевизионной аппаратуре одна точка снимается 25 раз в 1 сек, тогда как критическая частота мелькания при такой освещенности экрана равна 50 гц. Для того чтобы устранить мерцание, на экран наносится вещество с послесвечением, с длительностью 0,4 сек. Однако мерцание устраняется только для центрального зрения. Для снятия мелькания в центральном и периферическом зрении применяется передача вначале четных, затем нечетных строк, и частота в этом случае повышается до 50 гц.

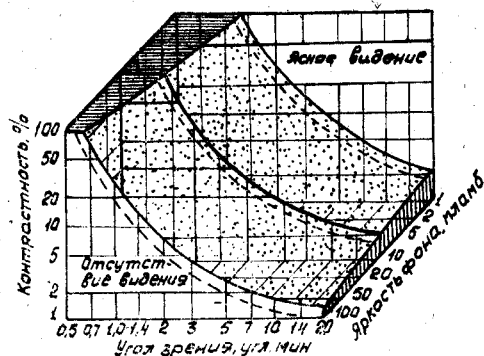


Рис. 20.

Когда мелькание применяется для передачи информации, тогда частоту вспышек необходимо брать 3—10 гц, а длительность — не менее 50 мсек.

К общим характеристикам оптического анализатора относится пространственный порог, характеризуемый остротой зрения. За нормальную остроту зрения принимается такая, порог которой равен 1 угл. мин. Острота зрения зависит от расстояния до видимого объекта, интенсивности освещения, контраста и фона (рис. 20).

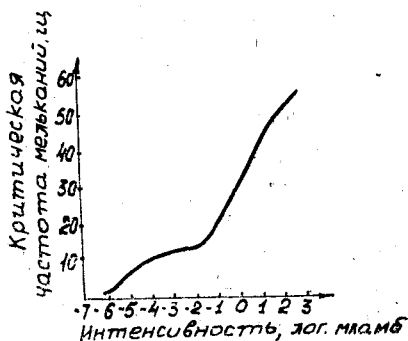


Рис. 19.

На этом рисунке показаны: пунктирными линиями — для выдержки в 300 мсек; сплошными линиями — для 75 мсек.

## § 6. СЛУХ

Во многих системах контроля и управления значительная часть информации поступает в форме звуковых сигналов. Основными параметрами звуковых волн являются амплитуда, частота и форма, которые отражаются в слуховых ощущениях (громкость, высота и тембр). Модуляция звуков по этим параметрам позволяет передать огромную по объему информацию, при приеме которой человек детектирует звуковой сигнал.

Диапазон звуковых колебаний, вызывающих слуховое ощущение, представлен на рис. 21.

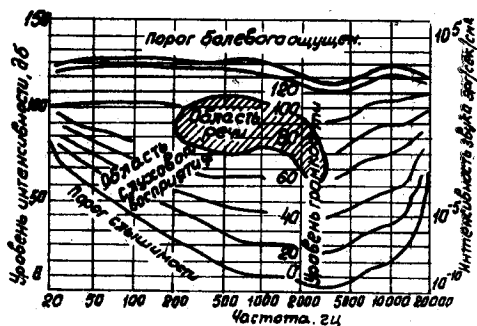


Рис. 21.

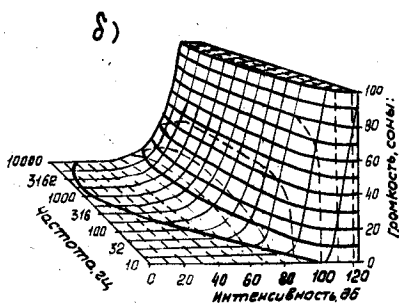
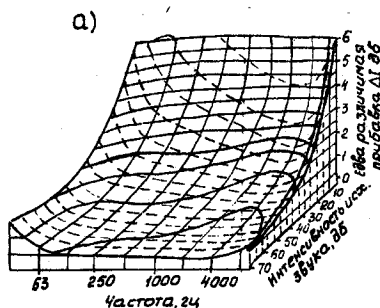


Рис. 22.

Центральное место на «шкале» звукового анализатора по интенсивности и частоте занимает зона звуков человеческой речи. Это свидетельствует об особой роли звукового языка, являющегося средством общения между людьми.

Дифференциальный порог акустического анализатора по интенсивности зависит от интенсивности звукового раздражителя и его частоты (рис. 22).

Соотношение интенсивности и частоты определяет ощущение громкости звука.

Дифференциальный порог по частоте зависит от частоты и интенсивности исходного звука (рис. 23).

В целом необходимо отметить, что у человека различение звуков по частоте более совершенно, чем по интенсивности. Все это справедливо при тишине. На практике необходимо учитывать шум.

Пороги обнаружения чистого тона с частотой 100—10 000 гц на фоне белого шума, имеющего разные уровни интенсивности, представлены на рис. 24.

Здесь VIII — уровень шума; ПТ — порог обнаружения тона в тишине.

Временной порог чувствительности с увеличением интенсивности и частоты сокращается. Оценка громкости и высоты коротких звуков (2—3 мсек) затруднена: звук воспринимается как «щелчок». Минимальная длительность звука, при которой оценивается его качество, равна 50 мсек.

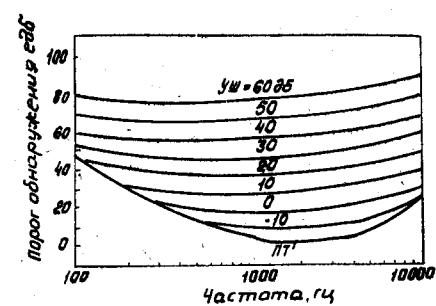


Рис. 24.

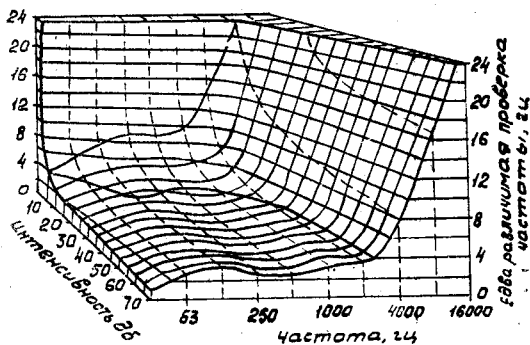


Рис. 23.

Акустический анализатор обеспечивает отражение не только амплитуды, частоты и формы колебаний звуковых волн, но и положение источника звука в пространстве: его расстояние и направление относительно субъекта. Расстояние для движущегося объекта оценивается точнее, чем для неподвижного, так как учи-

тывается скорость нарастания интенсивности звуков, изменения их частоты (эффект Доплера) и тембра.

Точность определения направления звуков зависит от частоты, координат человека (АЗ, УМ и т. д.).

Для низких частот (до 800 гц) порог различения направления в горизонтальной плоскости равен 10—11°; с увеличением частоты (до 3000 гц) он возрастает, а затем снова уменьшается.

Решающую роль в восприятии направлений звука играет взаимодействие сторон акустического анализатора (бинауральный эффект). Воспринимаемый угол отклонения от средней линии пропорционален величине этой разности. Основу дифференцировки

направления звука составляет разность по времени, фазам и интенсивности возбуждения между двумя сигнализациями в кору головного мозга от обеих ушей.

## § 7. ДРУГИЕ ВИДЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Различают такие виды чувствительности:

- вибрационную;
- тактильную;
- температурную;
- болевую;
- мышечную и суставную;
- статико-динамическую;
- обоняние;
- вкус;
- органическую.

*Вибрационная чувствительность* — чувствительность оператора к вибрациям. При небольшой интенсивности и длительности вибраций уменьшается утомляемость, повышается обмен веществ, восстанавливается трофика тканей и увеличивается мышечная сила. Вибрация высокой интенсивности при продолжительном воздействии приводит к серьезным изменениям деятельности систем организма и при определенных условиях может вызвать тяжелое заболевание.

Диапазон ощущения вибраций весьма широк: от 1 до 10 000 гц. Наиболее высокая чувствительность к частотам 200—250 гц (рис. 25), где 1 — абсолютный порог; 2 — порог тягостного ощущения.

*Дифференциальная чувствительность* человека по частоте и амплитуде достаточно высокая: разница тонов определяется с точностью 8%; амплитуда — с точностью до 3—5 мк (при 100 гц).

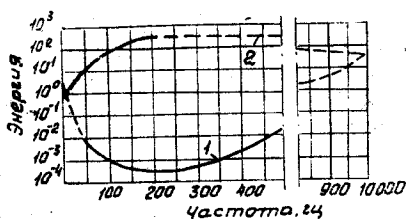


Рис. 25.

Пороги вибрационной чувствительности различны в различных участках тела.

*Тактильная чувствительность* — ощущение давления предмета на кожную поверхность. Диапазон давлений, адекватно

отражаемых в тактильных ощущениях, различен для различных участков тела. Дистальные части тела обладают наибольшей чувствительностью и наиболее широким диапазоном. Например, кончики пальцев руки чувствуют от 3 г/мм<sup>2</sup> (нижний абсолютный порог) до 300 г/мм<sup>2</sup> (верхний абсолютный порог).

Порог различения в среднем равен примерно 0,07 исходной величины давления.

Интенсивность ощущений зависит от скорости деформации кожи (чем больше скорость, тем выше интенсивность) и длительности действия раздражителя (временной порог равен 130 мсек).

Пространственный порог зависит от места приложения и является наименьшим на дистальных частях тела (порог ладонной части пальца руки равен 2,2 мм).

*Температурная чувствительность* — ощущение разности температуры кожи и окружающей среды. Она свойственна лишь тем организмам, которые обладают постоянством температуры тела (изотермией).

В коже человека обнаружено два рода температурных рецепторов: один реагирует только на холод, другой — на тепло.

Абсолютный порог тепловых рецепторов равен  $0,2^{\circ}$ , для холодных — равен  $0,4^{\circ}$ . Дифференциальный порог равен  $1^{\circ}$ . Пространственные пороги различны по отношению к различным формам стимуляции. При контактной стимуляции вызывает температурное ощущение воздействие на  $1 \text{ мм}^2$ , при излучении — воздействие на  $700 \text{ мм}^2$ .

Латентный период температурного ощущения равен 250 мсек.

*Болевая чувствительность* — ощущение, вызываемое в любом анализаторе воздействием на специальные рецепторы болевой чувствительности сверхмощного раздражителя, превышающего верхний порог. Болевое ощущение вызывает оборонительный рефлекс, в частности рефлекс удаления от раздражителя, в то время как другие ощущения, например тактильные, интимно связаны с ориентировочными рефлексам, рефлексам на сближение с раздражителем.

В болевых ощущениях достаточно точно отражаются интенсивность, качество, длительность воздействия болевого раздражителя, а также место его приложения.

Наибольшей болевой чувствительностью обладает роговица (порог  $0,2 \text{ г/мм}^2$ ).

В области боли основной психофизический закон не действует. Здесь существует почти прямая зависимость между интенсивностью ощущения и раздражения в диапазоне до порога выносливости.

Латентный период болевого ощущения составляет 370 мсек. Критическая частота слияния дискретных болевых раздражений равна 3 гц.

*Мышечная и суставная чувствительность* — особого рода ощущения, вызываемые в особых анализаторах, отражающих движение и положение частей тела в области коры больших полушарий.

Рецепторы анализатора движений расположены в мышцах, капсулах мышц, сухожилиях и фасциях. Они раздражаются механическими воздействиями, возникающими при изменении напряжения мышечной ткани и взаимоположения суставов.

Мышечные и суставные ощущения обеспечивают отражение всех основных качеств движения человеческого тела и его орга-

нов: интенсивности, скорости, длительности, амплитуды, траектории и т. д.

*Статико-динамическая чувствительность* — ощущение положения тела и ускорений. Анализатором, производящим ощущения положения тела, его вращения и перемещения в окружающем пространстве, является вестибулярный аппарат с соответствующими нервными путями и мозговым концом. Периферический конец анализатора расположен во внутреннем ухе и имеет две группы рецепторов. К первой относятся волосковые клетки, выстилающие поверхность полукружных каналов и раздражаемые перемещением эндолимфы при изменении положения тела в пространстве. Это обеспечивает отражение вращательных движений, а также частично — положения тела и линейного ускорения. Вторая группа рецепторов расположена в преддверии внутреннего уха, представляет собой чувствительные клетки мешочков преддверия, раздражаемые давлением известковых кристаллов-отолитов. Их адекватными стимулами являются сила тяжести и линейное ускорение. Благодаря сигналам этих рецепторов обеспечивается отражение положения тела по отношению к плоскости опоры.

Пороговое ускорение при вращении вокруг вертикальной оси равно  $0,8—2,4 \text{ град/сек}^2$ .

Порог ощущений, возникающих, при наклоне тела, зависит от направления наклона. При наклоне вперед-назад — равен  $2^\circ$ ; при наклоне вправо-влево — от 1 до  $1,5^\circ$ .

Порог чувствительности к ускорению прямолинейного движения в горизонтальном направлении составляет  $0,1 \text{ м/сек}^2$ , в вертикальном направлении —  $0,12 \text{ м/сек}^2$ .

В условиях невесомости порог чувствительности вестибулярного аппарата понижаются. При длительном воздействии раздражений возникают симптомы болезни укачивания. Специальная подготовка операторов улучшает формирование функциональных связей вестибулярного анализатора со зрительным и двигательным.

*Обоняние* — ощущения, отражающие индивидуальное свойство химических веществ — запах. Качество запаха и его интенсивность определяются структурой соединения, а также его летучестью и растворимостью.

Абсолютный порог обоняния у человека весьма мал: он измеряется миллиграммами и тысячными долями миллиграмма вещества на литр воздуха. Дифференциальный порог высок и составляет в среднем  $38\%$ .

*Вкус* — ощущения, отражающие индивидуальные свойства веществ, потребляемых организмом в процессе пищевого обмена. Существует четыре вида элементарных вкусовых ощущений: сладкого, горького, кислого и соленого. Все остальные представляют собой их комбинации.

Абсолютные пороги вкусового анализатора зависят от вкусовых качеств и примерно в 10 000 раз выше, чем обонятельного.

Наименьшим порогом обладает чувствительность к горькому, затем к кислому, соленому и, наконец, к сладкому.

Сдвиги процесса обмена изменяют чувствительности вкусового обмена.

Дифференциальный порог вкусовой чувствительности составляет около 20%.

*Органическая чувствительность* — ощущения, отражающие состояние внутренних органов живых существ. При нормальном функционировании и состоянии внутренних органов сигналы слабо дифференцируются субъектом и не осознаются. При нарушении деятельности возникают отчетливые ощущения, позволяющие грубо локализовать нарушение, а иногда его характер.

По характеру стимуляции все рецепторы внутренних органов делятся на хеморецепторы, чувствующие изменения в обмене веществ между тканями; терморецепторы, отражающие температуру внутренних органов; болевые рецепторы, отражающие нарушение тех или иных функций; механорецепторы, к которым относятся барорецепторы, реагирующие на изменение давления во внутренних органах, и тактильные рецепторы.

Характеристики органической чувствительности пока слабо изучены.

В сводной таблице 5 дан диапазон чувствительности по отношению к различным характеристикам стимулов.

## § 8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АНАЛИЗАТОРОВ

Описанные анализаторы функционируют не изолированно друг от друга. Они связаны в единую сложную систему. Воздействие на один из анализаторов не только вызывает его прямую реакцию, но и приводит к тем или иным изменениям всех других анализаторов. Точно также реакция какого-либо анализатора на воздействие стимула зависит также от состояния остальных. В этом выражается принцип целостности организма.

Механизм взаимодействия анализаторов сложен. Различают «эфантические» связи, обеспечивающие прямую передачу возбуждений с нейронов одного анализатора на нейроны другого, связь через вегетативную нервную и гуморальную системы. Во взаимодействии анализаторов играет также роль ретикулярная формация, участвующая в регулировании уровня возбуждения коры головного мозга, однако ядром всего взаимодействия анализаторов является рефлексорный путь: постоянные и временные нервные связи между их мозговыми концами.

Связи можно подразделить на активизирующие, обеспечивающие определенный уровень активности анализатора при воздействии побочных раздражителей; информирующие, оказывающие прямое влияние на содержание возникающих образов и вызывающие ас-



Т а б л и ц а 5  
Диапазон чувствительности по отношению к различным характеристикам стимулов

Чувствительность	Стимул	Диапазон обнаружения		Число различных градаций
		нижний абсолютный порог	верхний порог	
Зрительная	Интенсивность белого света . . .	$(2,2 \div 5,7) \cdot 10^{-10}$ эрг	10 (пороговая интенсивность)	570 128 375
	Цвет . . . . .		1050 мкк 50 прерыв/сек	
	Прерывистый белый свет . . .			
Слуховая	Интенсивность звука . . . . .	300 мкк 1 прерыв/сек	$10^{14}$ (пороговая интенсивность) 20 000—22 000 гц 2 000 прерыв/сек	325 при частоте 2000 гц 1800 460
	Частота чистого тона . . . . .	$10^{-9}$ эрг/см <sup>2</sup> 16—20 гц		
	Прерывистый белый шум . . .	1 прерыв/сек		
Кожно-механическая и вибрационная	Вибрация (по амплитуде) . . .	0,00025 мм	40 дб. выше порога	15
	Давление . . . . .	0,025 эрг	$10^6$ (пороговая интенсивность)	—
	Частота колебаний . . . . .	1 гц	10 000 гц	180
Температурная	Температура . . . . .	0,00015 град малых кал/см <sup>2</sup> /сек	0,218 град малых кал/см <sup>2</sup> /сек	—
Статико-динамическая	Положение и движение . . . . .	0,2—0,7 град	Положительная сила инерции—8, отрицательная—4,5 —	—
	Угловое ускорение . . . . .	0,12 град/сек <sup>2</sup>		—
	Линейное ускорение . . . . .	0,08 град		—
Обонятельная	Запах . . . . .	$2 \cdot 10^{-7}$ мг/м <sup>3</sup>	—	—
Вкусовая	Вкус . . . . .	$4 \times 10^{-7}$ г·мол концентрированного раствора	—	—

социации ощущения, их переводы из одной модальности в другую: викарирующие (замещающие) связи, проявляемые замещением некоторых функций одного анализатора другим.

На основе взаимодействия анализаторов формируются функциональные системы: система осязания, включающая тактильную, температурную, мышечную и суставную чувствительности; визуальную систему, ядром которой являются зрительный анализатор и вестибулярный аппарат и т. д.

Наряду с функциональными системами в связи с профессиональной деятельностью человека формируются специализированные связи (у телеграфиста — между слуховым и зрительным, у дегустатора — между вкусовым и двигательным).

Система анализаторов человека является многоканальной и обладает огромными возможностями по приему сигналов. Однако при конструировании аппаратуры в основном отдается предпочтение пока зрительным анализаторам, реже применяются звуковые и почти совершенно не используются тактильные, вкусовые и т. д.

Более перспективными техническими системами будут являться системы, использующие многоканальные анализаторы.

## ГЛАВА III

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИЕМА, ПЕРЕДАЧИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОПЕРАТОРОМ

Кроме пороговых характеристик материальных явлений, вызывающих ощущения, для практики интересна также оценка количества информации, которое может быть передано человеку посредством того или иного сигнала в определенные временные интервалы. В связи с этим человека или отдельные звенья его непрерывной системы можно рассматривать как каналы связи. Правомерность такого подхода не вызывает сомнения, так как одним из компонентов деятельности нервной системы является аппарат статистической обработки поступающих сигналов, «счетный» механизм, использующий принципы статистики.

В главе III описывается способ оценки эффективности работы системы контроля и управления (СКУ) совместно с оператором на основе математических моделей потенциальных и реальных возможностей. В основу построения модели положена вероятность выполнения задачи СКУ и оператором, количества информации, получаемой СКУ и оператором, и затрат [4].

При разработке сложных СКУ возможно осуществить математическое моделирование на непрерывных и дискретных ВМ идеальных и реальных процессов контроля и управления, осуществляемых оператором и СКУ. Введение идеальных (потенциальных) моделей обусловлено необходимостью оценки эффективности и оптимизации реальных возможностей оператора относительно потенциальных.

#### § 1. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СКУ И ОПЕРАТОРА

На рис. 26 приведена функциональная модель оператора и системы контроля и управления сложным объектом, на который действует некоторый вектор внешних и внутренних возмущений  $Z (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k)$ , носящих случайный характер.

Эти возмущения обуславливают случайность вектора координат объекта

$$X(x_1, x_2, \dots, x_m).$$

Вектор выходных координат объекта может определять пространственное и временное положение объекта, а также нести информацию о его состоянии при воздействии на него вектора управляющих сигналов

$$\Phi(\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_m),$$

вырабатываемых системой контроля и управления. На систему контроля и управления в определенных условиях может подаваться оператором вектор сигналов

$$Z(z_1, z_2, \dots, z_l).$$

Выполняя измерения векторов  $X$  и вектора, характеризующего состояние СКУ,

$$U(u_1, u_2, \dots, u_l)$$

анализаторами, включающими измерительные системы (ИС) и принимая решения решающей системой (РС) о состоянии объекта совместно с СКУ, оператор формирует вектор решений

$$Y(y_1, y_2, \dots, y_m).$$

Векторы  $\Phi$ ,  $Z$ ,  $U$ ,  $Y$  имеют случайный характер, обусловленный конечной точностью работы оператора и аппаратуры.

На рассмотренной функциональной схеме показаны основные связи между оператором и элементами процесса контроля и управления, позволяющие построить обобщенные математические модели.

Рассмотрение более мелких деталей может привести к значительным усложнениям математических моделей без изменения их сущности.

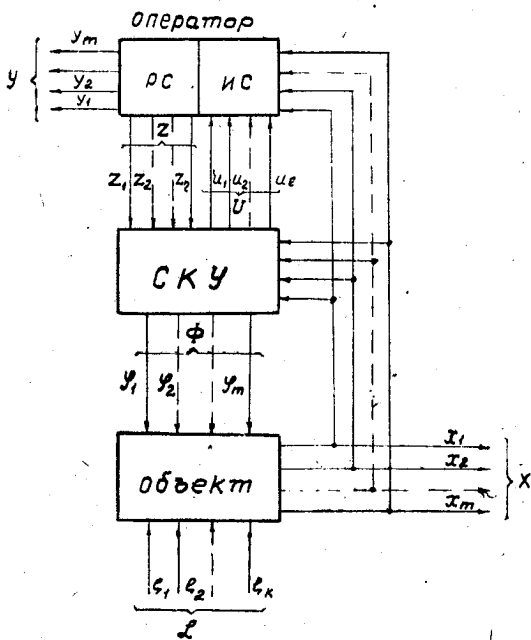


Рис. 26.

## § 2. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СКУ — ОПЕРАТОР

Построение потенциальной модели СКУ — оператор удобнее начать с рассмотрения работы решающей системы. Для упрощения рассмотрим одномерные решения, которые не составляет особого труда обобщить на многомерные.

Предположим, что измерительная система измеряет координату  $x_i$  и передает результат измерения на решающую систему для перевода  $x_i$  в некоторый результат решения  $y_i$  (рис. 27).

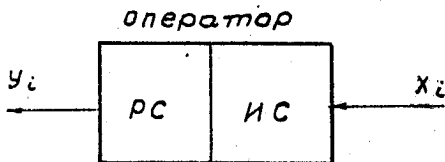


Рис. 27

В этом случае условная вероятность того, что координата находится, например, в норме или объект не отказал (индекс 1) может быть определена по формуле

$$p_{in}(x_{1i}/y_i) = \frac{p_{in}(y_i/x_{1i}) p_i(x_{1i})}{p_{in}(y_i)}, \quad (21)$$

где  $p_{in}(y_i/x_{1i})$  — условная вероятность принятия решения  $y_i$  при нахождении на входе события  $x_{1i}$ ;

$p_{in}(x_{1i})$  — вероятность появления  $x_{1i}$ ;

$p_{in}(y_i)$  — вероятность появления  $y_i$ .

Или с учетом закона распределения  $W(y_i/x_{1i})$

$$p_{in}(x_{1i}/y_i) = \frac{W_p(y_i/x_{1i}) p_{in}(x_{1i})}{p_{in}(y_i)}. \quad (22)$$

Условная вероятность того, что координата отклонилась от нормы или объект отказал (индекс 0)

$$p_{in}(x_{0i}/y_i) = \frac{p_{in}(y_i/x_{0i}) p_{in}(x_{0i})}{p_{in}(y_i)}, \quad (23)$$

где  $p_{in}(x_{0i}/y_i)$  — условная вероятность принятия решения  $y_i$  при нахождении на входе события  $x_{0i}$ ;

$p_{in}(x_{0i})$  — вероятность появления события  $x_{0i}$ .

С учетом закона распределения  $W_p(y_i/x_{0i})$

$$p_{in}(x_{0i}/y_i) = \frac{W(y_i/x_{0i}) p_{in}(x_{0i})}{p_{in}(y_i)}. \quad (24)$$

Решающая система принимает решения по определенному алгоритму, в основу которого положена функция и отношение правдоподобия соответственно:

$$\frac{p_{in}(x_{1i}/y_i)}{p_{in}(x_{0i}/y_i)} = \frac{W_n(y_i/x_{1i}) p_{in}(x_{1i})}{W_n(y_i/x_{0i}) p_{in}(x_{0i})}; \quad (25)$$

$$\Lambda_n = \frac{W_n(y_i/x_{1i})}{W_n(y_i/x_{0i})}. \quad (26)$$

При

$$p_{in}(x_{1i}/y_i) > p_{in}(x_{0i}/y_i)$$

принимается решение 1.

При

$$p_{in}(x_{1i}/y_i) < p_{in}(x_{0i}/y_i) \quad (27)$$

принимается решение 0.

Или при

$$p_{in}(x_{1i}/y_i) / p_{in}(x_{0i}/y_i) > 1$$

принимается решение 1.

При

$$p_{in}(x_{1i}/y_i) / p_{in}(x_{0i}/y_i) < 0$$

принимается решение 0.

С учетом (25) и (26) можно написать:

при

$$\Lambda_{ni} > \frac{p_{in}(x_{0i})}{p_{in}(x_{1i})} = \Lambda_{oi} = \frac{q_{ni}}{p_{ni}} \quad (28)$$

принимается решение 1;

при

$$\Lambda_{ni} < \Lambda_{oi}$$

принимается решение 0.

Для потенциальной системы при двухальтернативных решениях

$$p_{in}(x_{0i}) = p_{in}(x_{1i}) = \frac{1}{2}. \quad (29)$$

Для потенциальной системы при многоальтернативных решениях

$$p_{1n} = p_{2n} = \dots = p_{mn} = \frac{1}{m}. \quad (30)$$

Решающая система представляет собой идеального наблюдателя.

В случае, если решение принимается относительно непрерывного параметра, то считается, что параметр распределен по нормальному закону.

Решающая система потенциальной системы делает ошибки 1-го и 2-го рода.

За ошибку первого рода принимается вероятность ложного отказа

$$p_{\text{лоп}} = p_{\text{ни}}^{**}(y_i \supset V_0/x_{1i}). \quad (31)$$

За ошибку второго рода принимается вероятность необнаруженного отказа

$$p_{\text{ноп}i} = p_{\text{ни}}(y_i \supset V_1/x_{0i}). \quad (32)$$

Так как потенциальная система принимает решения по критерию идеального наблюдателя, то она минимизирует суммарную ошибку

$$p_{\text{лоп}i} + p_{\text{ноп}i} = \min. \quad (33)$$

В результате осуществления контроля и управления потенциальная система, включающая оператора и СКУ, переводит состояние объекта, характеризуемое вероятностью  $p_{\text{ин}}(x_{1i}/y_i)$ , в некоторое более определенное состояние, характеризуемое вероятностью

$$p_{\text{ин}}' = \frac{p_{\text{ин}} \bar{p}_{\text{лоп}i}}{p_{\text{ин}} \bar{p}_{\text{лоп}i} + \bar{p}_{\text{ин}} p_{\text{ноп}i}}, \quad (34)$$

получая при этом определенное количество информации

$$I_{1\text{max}} = H_{1\text{оп}} - H_{1\text{н}}, \quad (35)$$

где

$$H_{1\text{оп}} = -p_{\text{ин}} \log_2 p_{\text{ин}} - \bar{p}_{\text{ин}} \log_2 \bar{p}_{\text{ин}}; \quad (36)$$

$$H_{1\text{н}} = -p_{\text{ин}}' \log_2 p_{\text{ин}}' - \bar{p}_{\text{ин}}' \log_2 \bar{p}_{\text{ин}}' \quad (37)$$

соответственно энтропии состояния объекта до контроля и после контроля.

Общее количество информации, получаемое потенциальной системой

$$I_{\text{max}} = \sum_{i=1}^m I_{i\text{max}}. \quad (38)$$

Потенциальная система является идеальной не только в смысле ошибок, она является идеальной также в смысле простоты, так как в ней не предусмотрено резервирования, затрат для получения нужного быстродействия, объема, веса и т. п. Следовательно, потенциальная система при выполнении указанных условий будет иметь минимальные затраты

$$C_{\min} = \sum_{i=1}^m C_{i \min}. \quad (39)$$

Эффективность потенциальной системы оценивается коэффициентом

$$K_{I_0} = \frac{I_{\max \max}}{C_{\min}}, \quad (40)$$

представляющим отношение степени повышения достоверности состояния объекта в логарифмическом масштабе к затратам.

### § 3. РЕАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СКУ — ОПЕРАТОР

Математическая модель реальной СКУ и оператора строится аналогично математической модели потенциальной системы, однако, при этом принимаются реальные законы распределения вероятностей и различные алгоритмы работы решающих систем, обусловленные выбранным критерием оценки параметров.

Условная вероятность того, что координата находится в норме

$$p_1(x_{1i}/y_1) = \frac{p_1(y_1/x_{1i})p_1(x_{1i})}{p_1(y_1)}. \quad (41)$$

Или с учетом закона распределения вероятности  $W(y_1/x_{1i})$

$$p_1(x_{1i}/y_1) = \frac{W(y_1/x_{1i})p_1(x_{1i})}{p_1(y_1)}. \quad (42)$$

Условная вероятность того, что координата отклонилась от нормы или устройство отказало

$$p_1(x_{0i}/y_1) = \frac{p_1(y_1/x_{0i})p_1(x_{0i})}{p_1(y_1)}. \quad (43)$$

Или с учетом закона распределения вероятностей

$$p_1(x_{0i}/y_1) = \frac{W(y_1/x_{0i})p_1(x_{0i})}{p_1(y_1)}. \quad (44)$$



Функция и отношение правдоподобия могут быть определены соответственно по формулам:

$$\frac{p_i(x_{1i}/y_i)}{p_i(x_{0i}/y_i)} = \frac{W(y_i/x_{1i})p_i(x_{1i})}{W(y_i/x_{0i})p_i(x_{0i})}; \quad (45)$$

$$\Lambda = \frac{W(y_i/x_{1i})}{W(y_i/x_{0i})}. \quad (46)$$

Если решение принимается по критерию правдоподобия, то при

$$\Lambda > \frac{p_i(x_{0i})}{p_i(x_{1i})} = \Lambda_0$$

принимает 1.

Если

$$\Lambda < \Lambda_0$$

принимает 0.

Решающая система может быть построена с учетом различных критериев:

— для критерия идеального наблюдателя  $\Lambda_0 = 1$ ;

— для критерия минимального риска  $\Lambda_0 = \frac{L_1 q}{L_2 p}$ ,

где  $L_1$  и  $L_2$  — весовые коэффициенты;

— для критерия Неймана-Пирсона

$$\Lambda_0 = C.$$

Ошибками первого и второго рода являются соответственно:

$$p_{\text{лои}} = p_i(y \supset V_0/x_{1i}); \quad (47)$$

$$p_{\text{нои}} = p_i(y \supset V_1/x_{0i}),$$

которые рассчитываются с учетом всех ошибок реальной СКУ оператора.

После осуществления контроля вероятность выполнения объектом задачи по  $i$ -му параметру

$$p_i' = \frac{p_i p_{\text{лои}}}{p_i p_{\text{лои}} + p_i p_{\text{нои}}}. \quad (48)$$

Количество информации, полученное при контроле  $i$ -го параметра

$$I_{i \text{ max}} = H_i - H_i', \quad (49)$$

$$H_1 = -p_1 \log_2 p_1 - \bar{p}_1 \log_2 \bar{p}_1; \quad (50)$$

$$H_1' = -p_1' \log_2 p_1' - \bar{p}_1' \log_2 \bar{p}_1'. \quad (51)$$

Общее количество информации

$$I_{\max} = \sum_1^m I_{i \max}. \quad (52)$$

Общие затраты с учетом затрат на получение нужных надежности, быстродействия, объема веса и т. п. в реальной СКУ и оператора

$$C = \sum_1^m C_i. \quad (53)$$

Эффективность работы СКУ и оператора

$$K_1 = \frac{I_{\max}}{C}. \quad (54)$$

Эффективность СКУ и оператора

$$\mathcal{E} = \frac{K_1}{K_{10}} = \frac{I_{\max}}{I_{\max}} \frac{C_{\min}}{C}. \quad (55)$$

Достоинством обобщенного статистического критерия, полученного на основе потенциальной и реальной математических моделей, системы контроля и оператора является полнота, наглядность, сравнительная простота и общность, позволяющие одним числом характеризовать как всю систему контроля и управления с оператором, так и по частям, включающим сложные и простые устройства, а также отдельно оператора.

При этом диапазон изменения критерия для практических систем

$$0 \leq \mathcal{E} \leq 1.$$

Несовершенные СКУ и оператор имеют  $\mathcal{E}$ , близкий к нулю. Совершенные — к единице.

#### § 4. СПОСОБНОСТЬ ОПЕРАТОРА ПРИНИМАТЬ, ПЕРЕДАВАТЬ И ХРАНИТЬ ИНФОРМАЦИЮ

Информация, получаемая оператором в процессе управления и контроля при идентификации (опознании).

$$I = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i, \quad (56)$$

где  $p_i$  — вероятность  $i$ -го события из  $n$ .

Предельное количество информации, передаваемое одномерными стимулами разных модальностей, приведено в таблице 6.

Т а б л и ц а 9

Предельное количество информации, передаваемое одномерными стимулами разных модальностей

Модальность	Варьируемый признак стимула	Переданная информация, дв. ед.	
		при коротких экспозициях	при длинных экспозициях
Визуальные стимулы	Положение точки на прямой линии	3,2	3,9
	Длина прямой линии . . . . .	2,6	3,0
	Направление прямой линии . . . . .	2,8	3,3
	Кривизна дуги . . . . .	2,2	—
	Площадь простых фигур . . . . .	2,6	2,7
	Цвет . . . . .	—	3,1
Акустические стимулы	Яркость . . . . .	—	2,3
	Частота чистого тона . . . . .	—	2,2
	Интенсивность чистого тона . . . . .	—	2,3
Вкусовые стимулы Тактильно-вибрационные стимулы (в области груди)	Концентрация соли . . . . .	—	1,9
	Интенсивность вибраций . . . . .	—	2,0
	Длительность вибраций . . . . .	—	2,3
	Место вибраций . . . . .	—	2,8

Как видно из таблицы, наиболее высокими возможностями по приему информации обладает зрение, затем слух, кожно-механический анализатор и вкус.

Чем выше дифференциальная чувствительность анализатора, тем большая информация им может быть получена. Это указывает на связь процессов опознавания и различения. Вместе с тем идентифицируемых стимулов гораздо меньше (единицы), чем число различных стимулов (сотни и тысячи). Однако процесс различения всегда входит в процесс опознавания.

Общее количество информации, передаваемое многомерным стимулом, всегда меньше суммы тех количеств, которые передаются каждым из его измерений (рис. 28).

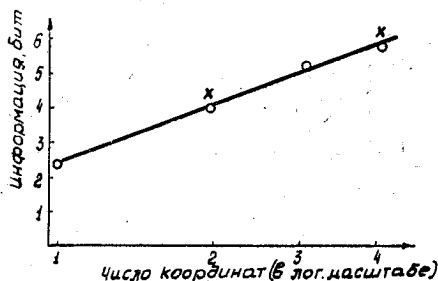


Рис. 28.

Лучше опознаются стимулы, расположенные в начале и конце предъявляемого ряда.

Включение дополнительных отсчетных точек в середину ряда улучшает процесс опознавания.

При разработке средств и способов индикации необходимо учитывать следующие положения.

1. Возможности различных анализаторов операторов по приему информации различны. Допустимая длина алфавита должна определяться в зависимости от модальности сигналов.

2. Величина максимальной информации, передаваемой сигналами, зависит от мерности его различения.

3. Длина алфавита сигналов, передаваемых оператору, может быть увеличена путем включения в их ряд дополнительных точек отсчета.

Наиболее важной характеристикой оператора является его пропускная способность

$$V_{\max} = \frac{I_{\max}}{T}, \quad (57)$$

где  $I_{\max}$  — максимальное количество информации, передаваемое оператором;

$T$  — время, в течение которого передается информация.

Очевидно, что работа системы контроля и управления, а также оператора будет надежной и эффективной только в том случае, когда скорость информации, поступающей от СКУ, не превысит пропускной способности оператора.

Максимальное количество информации, передаваемой в единицу времени оператором в различных видах деятельности, приведено на рис. 29, где 1 — чтение про себя; 2 — громкое чтение; 3 — корректорская работа; 4 — печатание на машинке; 5 — игра на фортепьяно; 6 — сложение двух цифр; 7 — умножение двух цифр; 8 — счет предметов.

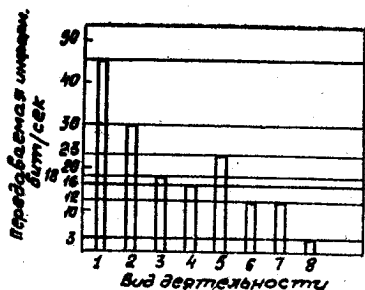


Рис. 29.

При оценке пропускной способности оператора необходимо различать операции приема, передачи и накопления информации, так как они обычно разделены во времени.

Одной из операций приема является операция опознавания. Пропускная способность зрительной системы составляет 50—70 дв. ед./сек.

Частоты ответов при опознании цифр при пороговом времени опознавания приведены в таблице 7. При этом каждая цифра предъявлялась 50 раз (по 10 предъявлений пятерым испытуемым).

Т а б л и ц а 7

Частоты ответов при опознании цифр при пороговом времени опознавания

Знаки (предъявляемые)	О т в е т ы										Всего ответов
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0	25			3			2		2	2	34
1	2	9	1	4	2	3	5	3	1	1	31
2	1	4	28	4	5	3		2	2	5	54
3	1			12							13
4	2	2	3	1	33		1	1	1		44
5	1	1		2	2	34	1			2	43
6	1	3	2	1	2	1	36		4	1	51
7	1	1	9	3	1	1	1	42	2	7	68
8						3			31	1	35
9	1	2							1	26	30
Отсутствие ответа	15	28	7	20	5	5	4	2	6	5	97
	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	500

В ряде случаев цифры не опознавались вообще или опознавались неверно. Пропускная способность при этом составляет примерно 58 дв. ед./сек.

Для букв пропускная способность примерно равна 91 дв. ед./сек. Минимальное время опознания букв и цифр составляет 0,06 сек. На скорость опознания влияют геометрическая сложность букв и цифр, яркость опознавательных знаков, длительность опознания алфавита и т. д. С учетом латентного периода речевой реакции величина пропускной способности окажется примерно в 10—20 раз меньше.

Максимальная скорость передачи информации определяется особенностями не только сигнала, но и ответной реакции, пространственного расположения органов управления, тренированности человека, значимости информации.

Зависимость полученной информации пропускной способности и времени попытки от времени самообучения приведены на рис. 30.

При скорости входной информации, превосходящей возможности человека по приему и передаче, наблюдаются следующие эффекты:

- пропуск сигналов;
- искажение сигналов;
- задержки в передаче сигналов;
- фильтрация потока сигналов;
- снижение распознавания деталей сигналов;
- исключение параллельных сигналов;
- отказ от решения задачи, т. е. прекращение деятельности.

При создании средств сигнализации необходимо ориентироваться на оптимальную скорость подачи информации, так как малая скорость подачи информации снижает активность.

В процессе деятельности оператора возникает необходимость запоминать информацию. Память человека можно разделить на оперативную и долговременную.

Объем оперативной памяти определяется не количеством сохраняемой информации, а количеством стимулов в ряду и почти не зависит от их информационного содержания. Оператор может точно повторить 9 двоичных цифр, около 8 десятичных, 7 букв ал-

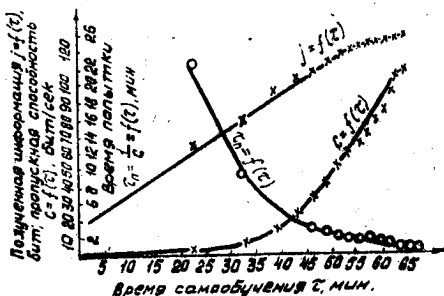


Рис. 30.

фавита, 5 односложных слов. Это соответствует 9, 26, 33 и 50 дв. ед. информации (рис. 31 и 32).

На рис. 31: пунктирные линии — теоретические (1 — для цифр; 2 — для слов); сплошная линия — эмпирическая.

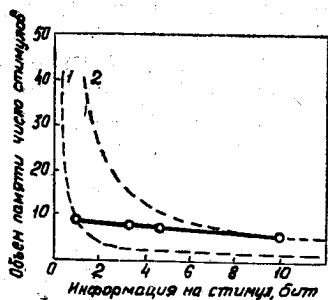


Рис. 31.

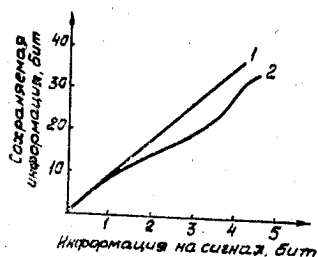


Рис. 32.

На рис. 32: 1 — теоретическая; 2 — эмпирическая.

Объем долговременной памяти, наоборот, определяется в основном величиной принимаемой информации (рис. 33 и 34) [5].

На рис. 33: а — объем кратковременной памяти; б — объем долговременной памяти.

На рис. 34 пунктирной линией показаны результаты эксперимента.

Различие между оперативной и долговременной памятью определяется различием функций в организации поведения человека.

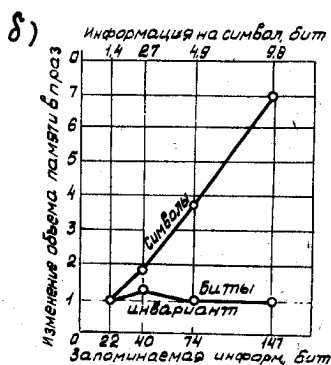
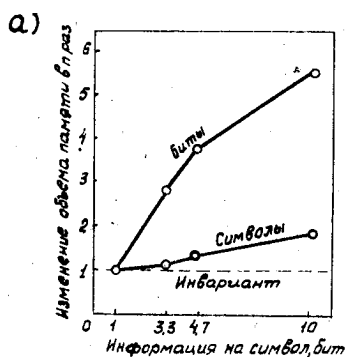


Рис. 33.

Оперативная память связана прежде всего с первичной ориентировкой в окружающей среде, с фиксацией общего числа вновь появляющихся сигналов вне зависимости от их информационного содержания. Долговременная память связана с организацией поведения в масштабах длительных интервалов времени, что требует

определенного предвидения, большего информационного содержания.

Процесс запоминания связан с перекодированием поступающей информации таким образом, чтобы сократить количество запоминаемых единиц, увеличивая информационное содержание каждой из них. При этом часть новой информации идентифицируется с той, которая уже хранится в памяти.

На запоминание влияют составные плана, установление смысловых связей, обобщение материала, выделение «опорных» точек и т. д.

Очень важное теоретическое и практическое значение имеет вопрос о времени, необходимом для запоминания определенного объема сигналов.

Время запоминания зависит от числа сигналов, числа параметров сигналов и тренировки (см. рис. 34):

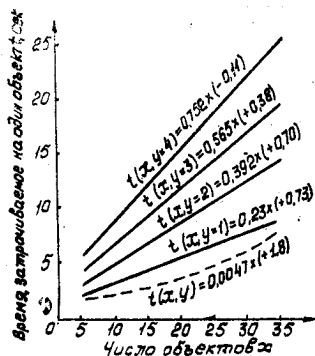


Рис. 34.

$$t(x, y) = 0,174x + 0,056x - 0,28y + 1, \quad (58)$$

где  $t(x, y)$  — время, затрачиваемое на один сигнал;

$x$  — число упорядочиваемых сигналов;

$y$  — число параметров, по которым осуществляется упорядочивание.

Тренировка оператора позволяет снять влияние числа параметров на время запоминания

$$t(x, y) = 0,0047x^2 + 1,8. \quad (59)$$

При этом значительная часть сведений записывается в долговременную память, а вновь поступающая информация сравнивается относительно долговременной. Таким образом, оперативная память является синтезом кратковременной и долговременной.

При разработке СКУ необходимо:

- установить роль оперативной и долговременной памяти;
- определить оптимальную скорость подачи информации;
- объединить сигналы в такие пространственные и временные структуры, которые бы легко поддавались перекодированию.



Закономерности процессов приема переработки и запоминания информации пока еще изучены недостаточно. Необходимо продолжить изучение различения, восприятия, опознания, представления, мышления, т. е. психических процессов и их регулирующей роли в действиях человека.

---

## ГЛАВА IV

### ИНДИКАТОР И ПУЛЬТ УПРАВЛЕНИЯ КАК СРЕДСТВО СОПРЯЖЕНИЯ ОПЕРАТОРА С СИСТЕМОЙ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Конструирование индикаторов и пультов управления с учетом логических принципов составляет основную часть инженерной психологии. Это обусловлено тем, что информация о ходе процесса контроля и управления поступает к человеку в виде показаний стрелочных приборов и счетчиков; телевизионных и радиолокационных изображений; набора условных знаков, цифр и букв; акустических сигналов и т. д., создаваемых индикатором. Через пульт управления поступают сигналы управления процессом контроля и управления.

#### § 1. КРИТЕРИИ ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

К основным психологическим критериям оценки индикаторов следует отнести следующие:

- различимость сигналов по модальности;
- пропускную способность или скорость передачи информации;
- род информации (командная или осведомительная);
- способ использования индикатора (для контрольного, качественного и количественного чтения);
- форма сигналов, т. е. отношение их к свойствам объекта (способ кодирования);
- масштаб изменения сигналов, т. е. количественное изменение сигналов, отнесенное к величине изменения параметров управляемого или контролируемого объекта.

Однако указанные критерии разработаны недостаточно, поэтому на практике пока ограничиваются обобщенной характеристикой, определяемой как читаемость индикатора и оцениваемой по показателям скорости и точности различения, опознания и интерпретации показаний.

При оценке индикаторов по обобщенному критерию их удобно подразделить на стрелочные индикаторы, панельные приборы, знаковые индикаторы электронно-лучевых трубок, графические индикаторы, индикаторы с цветовым кодированием и звуковые индикаторы.

## § 2. СТРЕЛОЧНЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Читаемость стрелочных индикаторов в сильной степени зависит от формы приборов. В таблице 8 приведены результаты экспериментальных исследований читаемости основных пяти форм шкал.

Т а б л и ц а 8

Результаты экспериментальных исследований читаемости

Форма шкалы	Счетчик (откры- тое окно)	Круго- вая	Полу- круговая	Горизон- тальная	Вертикаль- ная
Максимальный размер, см . . . . .	4,2	5,5	11,0	17,7	17,7
Ошибки считыва- ния, % . . . . .	0,5	10,9	16,6	27,5	35,5

Таким образом, наиболее точно читаются показания счетчиков, наихудшая читаемость вертикальных шкал. Преимущества счетчиков обуславливается простотой чтения, сводимой к опознанию цифр. Различие между горизонтальными и вертикальными шкалами, с одной стороны, круговыми или полукруговыми, с другой, объясняется мерностью стимулов.

Скорость и точность чтения стрелочных приборов зависит так же от того, что является подвижным элементом. При коротких экспозициях (менее 0,5 сек) точнее читаются приборы с подвижными шкалами. С увеличением экспозиции преимущества переходят к приборам с неподвижными шкалами. Однако применимость шкал зависит от рода решаемых оператором задач.

В таблице 9 дается сравнение трех индикаторов по возможности их использования для решения различных операторских задач.

Т а б л и ц а 9

Сравнение индикаторов по возможности их использования

Задача	Тип индикатора		
	с подвижной стрелкой	с подвижной шкалой	Счетчик
Количественное чтение . . . . .	Приемлем	Приемлем	Наиболее приемлем
Контрольное чтение . . . . .	Наиболее приемлем	Неприемлем	Неприемлем
Качественное чтение и слежение .	Наиболее приемлем	Приемлем	Неприемлем
Установка органов управления . .	Наиболее приемлем	Приемлем	Наиболее приемлем

Кроме того, читаемость зависит от начала отсчета (точнее, от начала слева), размера шкал (для круговых — оптимальный диаметр около 60 мм) и угловых размеров приборов (оптимальный — 2,5—5°).

На рис. 35 приведена номограмма, позволяющая определить необходимые для проектирования характеристики шкал, исходя из заданной погрешности чтения и дистанции наблюдения.

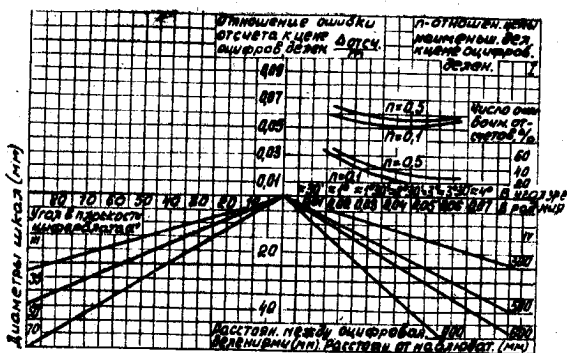


Рис. 35.

Точность и скорость чтения зависят также от других элементов стрелочных приборов: стрелок, цифр, шрифтов, расстояний между оцифрованными и неоцифрованными отметками, длины шкалы и т. д.

Совмещенная с плоскостью шкалы клиновидная стрелка с шириной конца не шире отметок на шкале, расположенных ниже отметок не более 1,6 мм, имеет преимущества перед другими.

Минимальная ширина штрихов должна быть в 1,5—2 раза более пороговой (около 0,8 мм); высота в 4÷6 раз больше ширины. Оцифрованные штрихи в 2—4 раза толще и в 2—2,5 раза длиннее минимальных.

Одним из важных факторов, влияющих на точность и скорость чтения шкал, является численное значение цены делений и оцифровка (наилучшими — с ценой деления 1, 5, 10 и т. д. с соответствующей оцифровкой), а также частота оцифрованных делений (лучше — каждое пятое деление).

Процесс чтения включает:

— фазу грубого чтения, определение области нахождения стрелки;

— фазу определения значения ближайшего отмеченного интервала и оцифрованного штриха;

— фазу оценки положения стрелки между штрихами, т. е. зрительную интерполяцию.

В процессе чтения теснейшим образом переплетаются акты различения, опознания и мышления. Поэтому показатели скорости и точности чтения зависят от состояния оператора и его натренированности.

### § 3. ПРИБОРНЫЕ ПАНЕЛИ

При конструировании пультов управления возникает задача пространственного расположения приборов из условий пространственного видения. Одной из главных характеристик пространственного видения является поле зрения, определяемое по величине того пространства, которое может видеть неподвижный глаз.

Поле монокулярного зрения при нормальном освещении и без ограничения времени восприятия для объектов белого цвета кнаружи (к виску) 90—94° от центра, кнутри (к носу) 60—62°, книзу 65—78°, кверху 55—60°. Поле бинокулярного зрения увеличено в горизонтальном направлении примерно до 120—180°. Поле хроматического зрения — меньше (наименьшее для зеленого цвета). При экспозиции объекта 0,2 сек оно составляет 18%.

На границах поля зрения человек может только заметить появление объекта, но не в состоянии воспринять его форму. Точность и скорость чтения с удалением прибора от центра поля зрения падает.

Выделяются две области приборной панели. В первой — центральной — области наблюдатель периодическим зрением видит стрелки всех приборов и для перевода прибора в зону фавельного зрения требуются только установочные движения глаз. Во второй — периферийной — области наблюдатель не видит ни поло-

жения стрелок, ни самих приборов, так как они расположены за границами поля и чтению показаний прибора предшествуют поисковые движения глаз.

На рис. 36 представлены оптимальные размеры указанных зон для дистанции наблюдений 80 см.

На рис. 37 представлены графики времени безошибочного чтения в зависимости от расстояния до центра поля зрения (1 — для правой части панели; 2 — для левой части панели).

В системах контроля и управления приборы могут быть размещены в нескольких плоскостях. Оптимальным является раз-

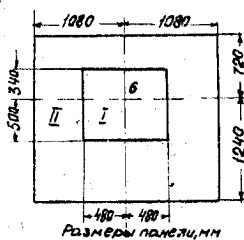


Рис. 36.

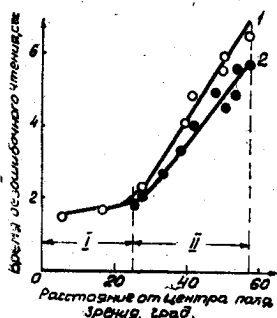


Рис. 37.

мещение приборов по внутренней стороне сферической поверхности.

На точность и скорость чтения оказывают влияние нулевые и критические отметки. Установлено, что лучше читаются шкалы приборов, у которых нули и отметки в одном и том же положении.

При разработке конструкции приборной доски необходимо также учитывать динамику и логику действий операторов.

Приборы, решающие одну задачу, следует выделять в целостный комплекс, при этом наиболее значимая группа должна располагаться в центре панели.

В тех случаях, когда оператор должен одновременно наблюдать как за поведением объекта, так и за показаниями приборов, необходимо согласованное расположение приборов на панели с расположением объекта.

#### § 4. ЗНАКОВАЯ ИНДИКАЦИЯ

Задача об оптимальном начертании цифр, букв и других знаков возникает при конструировании индикаторов систем контроля и управления.

Скорость и точность опознания цифр и букв зависит от их формы. Разные части букв и цифр несут разное количество информации.

При диффузном освещении оптимальное отношение толщины обводки к высоте цифр составляет 1:6—1:10. На дальних расстояниях белые цифры на темном фоне различаются лучше, чем черные на белом. Оптимальным отношением ширины к высоте является 1:2. При опознании букв стандартного машинописного шрифта возникают примерно такие же ошибки, что и при опознании цифр. Большинство их обусловлено сложностью начертания и сходством элементов разных букв. Как и при опознании цифр, так и при опознании букв, имеющих криволинейные элементы, ошибки получаются больше. Точнее опознаются буквы О, С, Т, Р, У, Ф, Ч, Д, К, Н, Ь, Г, А, Е, И и цифры 4, 7, 5, 3, 0, 1.

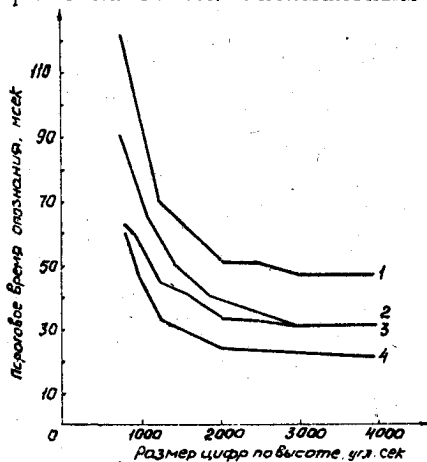


Рис. 38.

Эти графики с определенной достоверностью можно распространить и на опознание букв. На этом рисунке показано при освещенности: 1 — 1 лк; 2 — 10 лк; 3 — 20 лк; 4 — от 100 до 1000 лк.

При опознании фигур опознаются быстрее и точнее те, которые имеют резкие перепады (треугольник, ромб, прямоугольник, круг, квадрат).

Важным фактором опознания фигур являются их угловые раз-

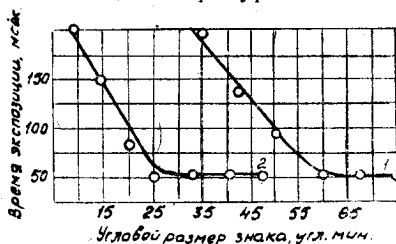


Рис. 39.

меры. Дорожные знаки опознаются в 100% случаев только тогда, когда их размеры не менее 4°10'.

Существует четкое различие между временными порогами восприятия (1) и опознания (2) (рис. 39).

В таблице 10 указаны ошибки, допускаемые при восприятии разных элементов знака.

Опознаются лучше знаки средней сложности, тогда как лучше воспринимаются простейшие знаки.

После восприятия и опознания знаков наступает процесс декодирования. Очевидно, что оптимальной является такая система кодирования, при которой отношение числа опознаваемых признаков знака к числу признаков объекта равно единице.

Т а б л и ц а 10

**Допускаемые ошибки при восприятии элементов знака**

Элементы	Отношение ошибок восприятия при разном времени экспозиции (мсек) к общему числу предъявлений					Угловой размер
	30	70	100	150	200	
Контур . . . . .	5	1	0	0	0	1° 40
Внутренние детали . .	20	14	10	0,8	0	13 — 33
Наружные детали . . .	23	15	7	1,5	0	6 — 20
Буквы . . . . .	65	40	27	2,5	0	20 — 23

Точность и скорость восприятия и опознавания знаков зависит от степени обученности и памяти.

В системах со знаковой индикацией информация передается набором знаков, которые могут состоять как из однородных, так и разнородных знаков. Лучше декодируются разнородные наборы, состоящие из цифр, букв и простых геометрических фигур, когда число знаков не превосходит восьми.

При формировании наборов знаков целесообразно, во-первых, использовать дополнительные опознавательные признаки, позволяющие различать знаки разного вида (например, окраску знаков в разные цвета, применение обводки разной толщины и т. д.); во-вторых, сопровождать появление каждого нового знака дополнительным сигналом (например, увеличивать его яркость или изменять частоту мелькания света и т. д.); в-третьих, знаки, относящиеся к одному и тому же параметру, объединять в группы.

**§ 5. ЭКРАНЫ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБОК**

Эффективность восприятия и опознания изображений на экранах электронно-лучевых трубок (ЭЛТ) зависит от характера модуляции сигнала, от типа развертки (строчная, радиальная, круговая, спиральная), от частоты смены кадров, от времени послесвечения экрана и других факторов.

Скорость и точность чтения показаний радиолокатора зависит от основных параметров электросистемы: от величины и формы импульсов, его длительности, частоты повторения, ширины видео-



полосы, фокуса луча, скорости вращения антенны, освещенности помещения.

С увеличением частоты, яркости сигнала и диаметра пятна сокращается время его поиска (рис. 40) и увеличивается вероятность обнаружения, где 1 и 2 — для двух испытуемых.

Нижний порог зрительного восприятия движения относительно покоящегося объекта равен 1—2 угл. мин/сек. При отсутствии неподвижного объекта — 25—30 угл. мин/сек (рис. 41), где 1, 2 —

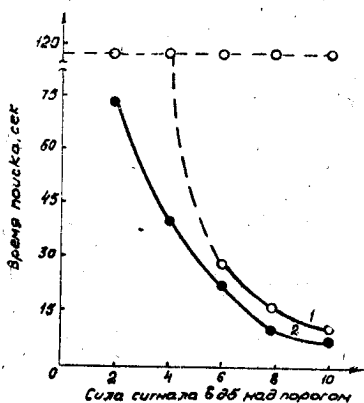


Рис. 40.

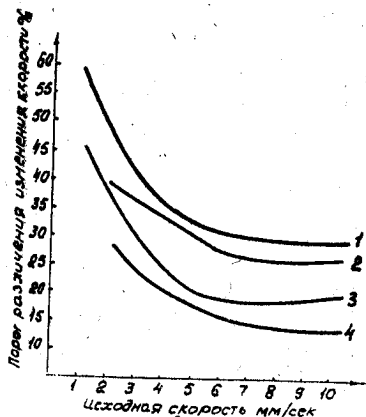


Рис. 41.

соответственно ясного различия увеличения и уменьшения скорости; 3, 4 — неясного. Он также зависит от исходной скорости. Некоторое влияние на динамическую остроту зрения оказывают сторона движения и длительность экспозиции.

Точность экстраполяции в сильной степени зависит от длительности наблюдений.

## § 6. ГРАФИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ. ЦВЕТОВОЕ КОДИРОВАНИЕ

Основой механизма навыков построения и чтения графиков, диаграмм или номограмм является перевод количественных представлений в пространственные, т. е. «пространственное кодирование». При переработке информации человек оперирует с целостными пространственными образами, решая при этом сложные вычислительные задачи. «Пространственное кодирование» позволяет совместить информацию о нескольких характеристиках в одном сигнале. Графическая индикация может быть использована для комплексного отображения ряда параметров управляемого объекта.

## Зависимость цвета объекта от цвета освещения

Цвет объекта	Цвет освещения			
	красный	голубой	зеленый	желтый
Белый	Светло-розовый	Светло-голубой	Светло-зеленый	Светло-желтый
Черный	Красновато-черный	Сине-черный	Зеленовато-черный	Оранжево-черный
Красный	Сверкающий красный	Темный голубовато-красный	Желтовато-красный	Ярко-красный
Голубой	Красновато-голубой	Ярко-голубой	Зеленовато-голубой	Светлый красновато-голубой
Синий	Темный красновато-фиолетовый	Сверкающий голубой	Темный зеленовато-голубой	Светлый красновато-фиолетовый
Желтый	Красно-оранжевый	Светлый красновато-коричневый	Светлый зеленовато-желтый	Сверкающий светло-оранжевый
Коричневый	Коричнево-красный	Синевато-коричневый	Темный оливково-коричневый	Коричнево-оранжевый

Цветовое кодирование — использование цвета в качестве алфавита сигнала. По теории в сетчатке глаза имеются три различных типа чувствительных элементов, каждый из которых реагирует лишь на один из трех основных цветов (красный, зеленый, синий). Ощущения всех остальных цветов возникают в результате совместного действия этих элементов. Однако в формировании ощущений цвета существенную роль играет динамика основных нервных процессов: возбуждения и торможения. При сравнительном различении человек может отличать до 300 000 цветов. С наибольшей точностью опознаются цвета: фиолетовый (430 мкм), голубой (476 мкм), зеленый (504 мкм), желтый (532 мкм), красный (610 мкм).

Натуральный цвет обнаруживается только при белом (дневном) освещении и меняется при хроматическом освещении (таблица 11). В условиях сумеречного зрения свет перестает быть видимым.

Видимый цвет предмета изменяется с удалением. На предельном расстоянии хроматические объекты воспринимаются как ахроматические.

Сигналы, находящиеся на периферии, кажутся ахроматическими. Ощущение цвета появляется при их приближении к центру.

Точность различения цвета объекта зависит от величины окрашенной поверхности: чем больше поверхность, тем точнее распознается цвет.

Цвет влияет также на восприятие человеком времени: желтый и коричневый цвета приводят к недооценке времени, а красный, зеленый, синий и особенно серый — к переоценке.

Цветовое кодирование широко применяется для передачи сигналов об опасности. Сигналами опасности являются теплые тона (красный — требование остановки действия, оранжевый — предупреждение о серьезной опасности, желтый — внимание), безопасности — холодные (зеленый — отсутствие опасности, голубой — не начинать действий).

Цветом можно создать «эмоциональный тон», повлияв на уровень работоспособности, снять напряженность, ощущение жары или холода.

## § 7. ВОСПРИЯТИЕ РЕЧЕВЫХ СООБЩЕНИЙ

Наиболее эффективным средством передачи информации человеку является речь. Речемыслительные процессы так или иначе включаются в операции приема и переработки информации; в какой бы форме она не передавалась.

Знание характеристик восприятия речевых сообщений важно для решения двух задач: для определения принципов разработки аппаратуры, предназначенной для передачи речевых сообщений, и для определения принципов организации речевых сообщений.

Основными акустическими параметрами речевого сигнала являются интенсивность, частота, спектр и длительность. Средняя мощность речи равна примерно 10—20 мквт. Диапазон изменения интенсивности речевых звуков составляет примерно от 60 до 90 дб.

Срезание частот влияет на разборчивость речи. Фильтры верхних и нижних частот дают различные эффекты (рис. 42). На рисунке: 1 — фильтр верхних частот; 2 — фильтр нижних частот.

Для повышения разборчивости речи увеличивают ее интенсивность.

Восприятие и понимание речевых сообщений зависит от темпа

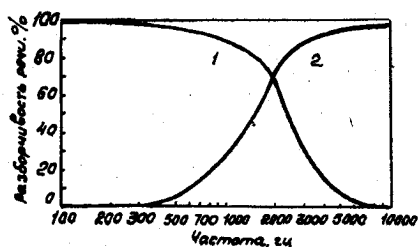


Рис. 42.

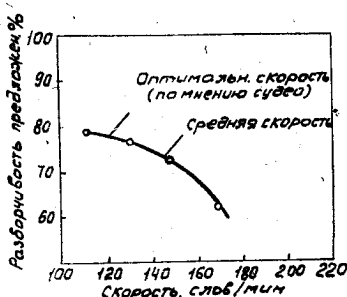


Рис. 43.

их передачи (оптимальный темп 120 слов в минуту — рис. 43) и повторения.

Белый шум действует на восприятие речи разрушающим образом. Речь понятна, если интенсивность речи превышает интенсивность шума на 6 дб (рис. 44).

На рис. 44: 1 — порог разборчивости речи; 2 — порог обнаружения речи.

При распознавании речи в «речевом коктейле» существенное значение имеет смысл и постановка фильтров.

Эффективность аудирования имеет большое значение при организации речевого сообщения.

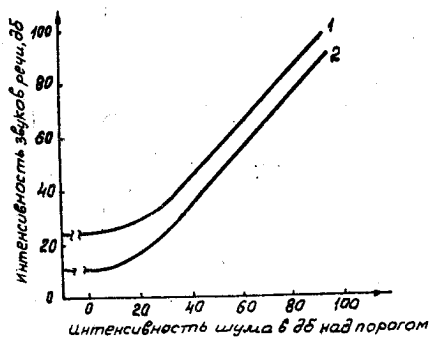


Рис. 44.

В условиях шума двухсложные слова на 30% опознаются лучше, чем односложные, а трехсложные — на 50%. Слова с ударе-

нием на последнем слоге опознаются лучше, чем с ударением на первом.

Важным фактором, влияющим на опознание слов, является их вероятностная, точнее, частотная характеристика: чем чаще встречается слово, тем лучше оно опознается.

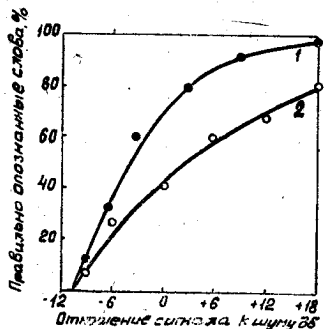


Рис. 45.

Правильность опознания слов зависит от контекста (рис. 45), так как акты опознавания слов и фраз теснейшим образом переплетаются с актами осмысления.

На рис. 45: 1 — опознание слов, включенных в контекст; 2 — опознание слов вне контекста.

Длина фраз не имеет для слушателя особого значения примерно до 11 слов. Превышение этого количества существенно снижает эффективность аудирования и возможность восстановления фраз. Это можно объяснить ограниченностью объема оперативной памяти, которая равна примерно 8 словам в фразе.

## § 8. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ИНДИКАТОРОВ В СКУ

Рассмотренные виды индикации являются, по существу, различными способами кодирования информации, передаваемой оператору.

Эффективность кодирования определяется решаемой задачей. Поэтому при выборе кода в любом конкретном случае необходимо прежде всего четко определить круг задач, решаемых оператором. Оптимальным будет такой код, который разработан в соответствии с характеристиками и закономерностями психических процессов при контроле и управлении.

При обнаружении сигналов и принятии решений существенное влияние на эффективность оказывает статистика появления сигналов. В этом случае для зрения критическим числом является 5—6 сигналов.

Обнаружение сигналов связано с процессом различения, при котором различные анализаторы обладают различными возможностями при различении одномерного сигнала:

— глаз способен различать 570 градаций интенсивностей белого света;

— ухо — до 25 градаций интенсивностей тона;

— кожно-механический анализатор — до 180 градаций сигнала по частоте.

Многомерность сигналов может повысить эффективность передачи информации.

Эффективность идентификации определяется в основном четкостью и организованностью системы эталонов. В этом отношении цифровой код является наиболее эффективным.

Заключительным процессом приема информации является декодирование, перешифровка или перевод образа сигнала в образ управляемого или контролируемого объекта. Скорость и точность перешифровки зависит от развитой и натренированной системы ассоциаций.

Таким образом, при выборе индикаторов следует основываться на характеристиках процессов обнаружения, различения, идентификации и декодирования.

Конечной задачей разработки средств индикации является создание устройств, отображающих реальную обстановку.

## § 9. МОТОРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА

До сих пор при изложении материала основное внимание уделялось проблеме передачи информации от машины к человеку. Не менее важной является проблема передачи сигналов от человека к машине. Характеристики моторного «выхода» человека обуславливают требования к конструкции органов управления.

Основными данными, которые могут служить отправными точками конструирования органов управления, являются следующие. Диапазон скоростей движения рук простирается от 0,01 (при регулировках) до 8000 см/сек (при метании). В производственных операциях он простирается от 5 до 800 см/сек. В направлении «к телу» рука движется быстрее, чем в противоположном. Скорость движения рук в вертикальной плоскости больше, чем в горизонтальной. Вращательные движения совершаются примерно в полтора раза быстрее, чем поступательные. Более экономичным движением является движение толчком, с большой скоростью в начале движения.

Существенное значение при конструировании органов управления имеет максимальный объем изолированных движений органов тела, приведенный в таблице 12. При движении остальных компонентов объем производительных движений увеличивается.

Кисть по отношению к плечевому поясу имеет 7 степеней свободы, кончик пальца по отношению к грудной клетке имеет 16 степеней свободы, а по отношению к опоре (стопам) — 30. Практически дистальные части рук могут перемещаться по любым траекториям.

Максимальный объем изолированных движений органов тела

Часть тела	Активные движения, градусов									Пассивные движения, градусов							
	сгибание	разгибание	отведение	приведение	супинация	пронация	боковой наклон	скручивание	поднимание	опускание	сгибание	разгибание	отведение	приведение	супинация	пронация	скручивание
Туловище . . . . .																	
Шейная часть . . . . .	70	60					30	50			—	—					97
Грудная часть . . . . .	40	30					35	5			—	—					—
Поясничная часть . . . . .	50	55					100	40			—	—					—
В целом . . . . .	160	145					165	120			—	—					—
Рука . . . . .																	
Кисть . . . . .	95	60	27	60							106	91	40	74			
Предплечье . . . . .	140				90	91					143				114	105	
Плечо . . . . .	179	55	124			35					185	68	137			—	
Лопатка . . . . .			17	35					32	8							
Нога . . . . .																	
Бедро . . . . .	98	48	70		61	37					112	56	79		73	46	
Голень . . . . .	127				30	50					140						
Стопа . . . . .	28	37	12	25							36	44					

При определении допустимого сопротивления органов управления необходимо знать силу, с которой человек может производить движения (таблица 13).

Т а б л и ц а 13

Сила, с которой человек может производить движения

Положение руки, градусов	Левая рука, кг	Правая рука, кг	Левая рука, кг	Правая рука, кг
	Вытягивание (на себя)		Толкание (от себя)	
180	52,5	54,4	57,1	62,6
150	50,7	55,3	50,3	55,7
120	42,6	47,1	44,9	46,7
90	36,3	39,9	37,6	38,9
60	29	38,6	36,2	41,7
	Вытягивание (вверх)		Толкание (вниз)	
180	18,6	19,5	16	18,6
150	23,6	25,4	18,6	21,3
120	24,5	27,2	23,1	26,3
90	23,6	25,4	22,2	24
60	19,9	22,2	20,8	23,8
	Приведение (к себе)		Отведение (от себя)	
180	19,5	22,6	13,6	15,4
150	21,3	24,4	13,1	15
120	20,4	24	13,6	15,4
90	21,7	22,6	15	16,8
60	22,6	23,5	14,6	19

Как видно из таблицы, наибольшая сила развивается при толкании от себя и вытягивании на себя.

Эффективность программирования и управления сложными процессами зависит от способов, скорости и точности произвольной регуляции человеком рабочих движений.

Научные основы учения о регуляции рабочих движений были заложены И. М. Сеченовым и И. П. Павловым.



На рис. 46 приведена блок-схема аппарата управления движениями, предложенная Н. А. Бернштейном. Этот аппарат образует замкнутый контур регулирования, включающий шесть основных элементов:

1) эффектор (двигательный аппарат), работа которого управляется по заданному параметру;

2) задающий элемент, вносящий по заданной программе требуемое значение регулируемого параметра;

3) рецептор, воспринимающий фактические текущие значения значения параметра и передающий сигнал о них;

4) прибор сличения, выявляющий расхождение требуемого и фактического значений;

5) прибор перешифровки, переводящий данные прибора сличения в коррекционные импульсы, подаваемые регулятору;

6) регулятор, управляющий эффектором.

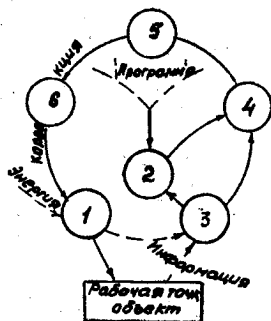


Рис. 46.

Структура двигательных компонентов и определяемые ею скорость и точность управляющего действия зависят от тех задач, которые решает оператор.

Двигательные задачи можно разделить на четыре группы:

- дизъюнктивные двигательные задачи (включение, выключение и переключения);
- выполнение повторяющихся движений с различным темпом;
- дозированные движения (настройка аппаратуры и т. п.);
- слежение за изменяющимися объектами.

При решении практических задач необходимо пользоваться принципом экономии рабочих движений Тейлора-Джилберта, включающего отсеивание тех движений, которые не являются безусловно необходимыми, выбор из всех возможных движений наиболее короткого и не требующего усилия.

Наиболее точными и быстрыми являются движения, направления которых совпадают с направлением сигнала, согласованы с ним по пространственным и временным характеристикам.

При оформлении рабочего места оператора правило «совместимости» индикаторов и органов управления особенно важно соблюдать при высоких скоростях действия, при возможности стрессовых ситуаций.

Кроме того, сопротивление, форма и величина органов управления должна рассчитываться с учетом характеристик не только двигательного, но и чувствующего аппарата руки.

## ГЛАВА V

### ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ

Существенное влияние на эффективность СКУ — оператор оказывает обученность операторов. В главе изложены данные сравнительного анализа некоторых критериев эффективности обучения и сделан вывод о целесообразности применения обобщенных информационных критериев эффективности, наиболее полно соответствующих физической сущности процесса обучения.

Рассматривается возможность использования выбранных критериев для синтеза средств обучения.

#### § 1. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ОБУЧЕНИЯ И СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ

В настоящее время существуют различные методы оценки степени обученности [6], [7], [8]. При изучении дискретного материала, в котором порции приблизительно равны, степень обученности может характеризоваться статистической вероятностью, определяемой как отношение числа усвоенных порций  $n$  к общему количеству преподаваемых порций  $N$ :

$$P_{об} = \frac{n}{N}. \quad (60)$$

В более общем случае обученность определяется ответами обучаемого на поставленные контрольные вопросы, которые адекватно определяют понимание или знание обучающимися данного материала. Содержание этих вопросов будет, конечно, зависеть от того лица, которое их составляет, так как ни один из двух педагогов не будет иметь совершенно одинакового мнения по одному и тому же вопросу. В конкретном случае обучаемый ответит на вопрос правильно (1) или неправильно (0), но эти величины не будут вероятностями, так как относятся к одной реализации.

В [6] рассматривается абстрактная совокупность обучаемых с одинаковой предысторией и способностями, и вероятность  $P_{об}(k)$  того, что какой-либо обучающийся даст правильный ответ на  $k$ -й вопрос, будет определяться как процент обучающихся из данной совокупности, давших правильный ответ на  $k$ -й вопрос.

Система «баллов» является наиболее распространенной при оценке обучаемых. Если обучаемый получил  $l$  баллов в  $m$ -балльной системе, то с известным приближением можно записать, что вероятность обучения

$$P_{об} = \frac{l}{m} \quad | 0 \leq P_{об} \leq 1 |.$$

Таким образом, намечается один общий вероятностный подход к оценке обученности.

Во всех рассмотренных выше случаях вероятность обучения  $P_{об}$  изменяется от 0 до 1. Можно наметить и несколько другой подход к оценке обученности.

Если преподаваемый материал разбить на порции и сформулировать к ним контрольные вопросы альтернативного типа, требующих ответа «да» или «нет», то при полном отсутствии знаний будет наблюдаться чистое угадывание, т. е.  $P_{об}^* = 0,5$ , и степень обученности будет характеризоваться максимальной неопределенностью (энтропией)

$$H_{\max} = -P_{об}^* \log P_{об}^* - (1 - P_{об}^*) \log (1 - P_{об}^*). \quad (61)$$

Переход к  $P_{об}^*$  в новой интерпретации от ранее установленной формы  $P_{об}$  может быть осуществлен по следующей формуле:

$$P_{об}^* = 0,5 (P_{об} + 1) \quad (62)$$

при  $0 \leq P_{об} \leq 1$ ;  $0,5 \leq P_{об}^* \leq 1$ .

Из [7] после некоторых преобразований будем иметь

$$P_{об} = P_0 \cdot e^{-\frac{C_r}{T}} + (1 - e^{-\frac{C_r}{T}}), \quad (63)$$

где  $P_0$  — начальная вероятность обучения;

$C_r$  — стоимость обучения;

$T$  — постоянная обучения.

Подставляя (63) в (62), получим

$$P_{об}^* = 0,5 e^{-\frac{C_r}{T}} (P_0 - 1) + 1. \quad (64)$$

Рассмотренные преобразования и полученные формулы будут использованы нами в дальнейшем при анализе обобщенного информационного критерия эффективности.

В [7] рассматриваются следующие критерии эффективности обучения:

$$U = \frac{1}{N} \sum_1^N P_a(m); \quad (65)$$

$$\lambda = \frac{1}{N} \sum_1^N [P_a(m) - P_b(m)], \quad (66)$$

где  $P_b(m)$ ,  $P_a(m)$  — вероятность правильного ответа на  $m$ -й контрольный вопрос соответственно до и после обучения.

С точки зрения обучаемого можно сказать, что  $U$  измеряет глубину понимания данного материала, в то время как  $\lambda$  является мерой того, какое количество информации усвоено в процессе обучения.

Введение в рассмотрение времени обучения  $t$  [7] позволяет перейти к динамической характеристике процесса обучения

$$R = \frac{1}{N \cdot t} \sum_{m=1}^N [P_a(m) - P_b(m)]. \quad (67)$$

В этом случае величина  $R$  может быть ассоциирована со скоростью обучения.

Как показано в [2], наиболее полным является критерий эффективности, учитывающий стоимость, поскольку через стоимость может быть выражено и время процесса  $t$ , и стоимость процесса, объем и вес оборудования, и стоимость самого оборудования.

Учитывая сказанное выше, можем записать

$$K(C, P) = \frac{P_{об}^* - P_o^*}{C_r}. \quad (68)$$

Подставляя (64) в (68), получим

$$K(C, P) = \frac{(1 - P_o) \left( 1 - e^{-\frac{Cr}{T}} \right)}{2 C_r}. \quad (69)$$

Исследуем критерий  $K(C, P)$  для различных значений  $P_o$  и  $C_r$ .

При  $C_r \rightarrow \infty$   $K(C, P) = 0$ .

При  $C_r \rightarrow 0$   $K(C, P) = \frac{1 - P_o}{2 T}$ .

Из анализа кривых, представленных на рис. 47, можно сделать вывод, что своего максимального значения  $K(C, P)_{\max}$  критерий достигает при  $C_r = 0$ , т. е. наиболее эффективным является обуче-

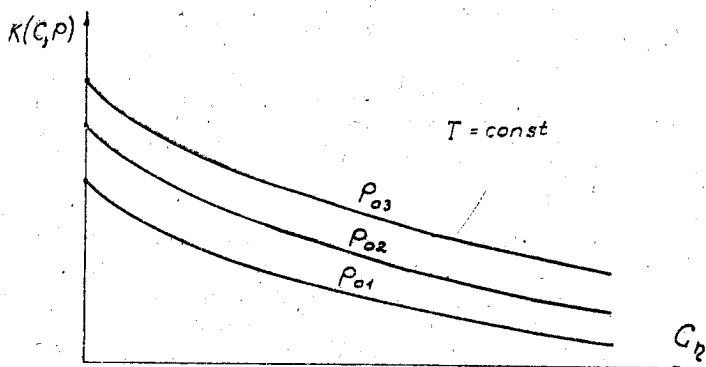


Рис. 47.

ние на начальной стадии, а еще лучше — вообще не учиться ( $C_r = 0$ ). Это противоречит здравому смыслу и опыту обучения.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что вероятностные критерии эффективности являются не только менее чувствительными, чем информационные, как показано в [2], но и менее соответствуют физическому смыслу процесса обучения.

Критерий будет действительно характеризовать эффективность процесса обучения только в том случае, если он охарактеризует информационную способность процесса обучения.

Количество информации, полученное обучаемым, определяется как

$$I_{06} = H_0 - H, \quad (70)$$

где

$$H_0 = P_0^* \log P_0^* - (1 - P_0^*) \log (1 - P_0^*)$$

— энтропия, характеризующая неопределенность «незнания» до начала процесса обучения;

$$H = - P_{06}^* \log P_{06}^* - (1 - P_{06}^*) \log (1 - P_{06}^*)$$

— оставшаяся энтропия после обучения.

Из равенства (70) видно, что оно характеризует реальную информационную способность процесса обучения. Потенциальная возможность определяется равенством

$$I_n = H_0. \quad (71)$$

Эффективность процесса обучения с информационной точки зрения можно оценить критерием

$$\mathcal{E}(I) = \frac{I_{об}}{I_{п}} = \frac{H_o - H}{H_o} \quad (72)$$

Этот критерий обладает следующими достоинствами. Критерий имеет физический смысл и действительно характеризует процесс обучения однозначно некоторым числом, изменяющимся от 0 до 1. При этом идеальный процесс обучения имеет эффективность, равную 1, реальный  $\mathcal{E}(I) < 1$ . При  $\mathcal{E}(I) \leq 0$  процесс обучения является неэффективным, так как новых знаний не прибавляется, а старые — забываются.

Однако, наряду с указанными достоинствами, критерий имеет существенные недостатки:

- критерий является статической оценкой эффективности;
- критерий не учитывает сложности и стоимости обучения.

Как показано в [2], критерием, не обладающим указанными недостатками, можно считать обобщенный статистический критерий оценки эффективности:

$$\mathcal{E}(I, C) = \frac{K(I, C)}{K_o(I, C)} \quad (73)$$

где

$$K(I, C) = \frac{I_{об}}{C_r} \quad (74)$$

— абсолютный обобщенно-статистический критерий;

$$K_o(I, C) = \frac{I_{\max \max}}{C_{r \min}} \quad (75)$$

— абсолютная обобщенная «потенциальная» статистическая характеристика идеального процесса обучения, относительно которой может быть произведено нормирование.

Здесь

$$I_{\max \max} = H_{o \max} = 1;$$

$C_{r \min}$  — стоимость идеализированного процесса обучения. Подставляя (64), (70) в (74), получим

$$K(I, C) = \frac{H_o + [0,5 e^{-\frac{C_r}{T}} (P_o - 1) + 1] \times \dots \times \log [\dots] + [-0,5 e^{-\frac{C_r}{T}} (P_o - 1)] \log [\dots]}{C_r} \quad (76)$$

На рис. 48 представлены кривые, соответствующие различным значениям  $P_0$  и  $C_r$ . Анализ показывает, что критерий  $K(I, C)$  достигает максимума в некоторых точках, соответствующих наибольшей интенсивности передачи информации ( $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ ...), но отнюдь

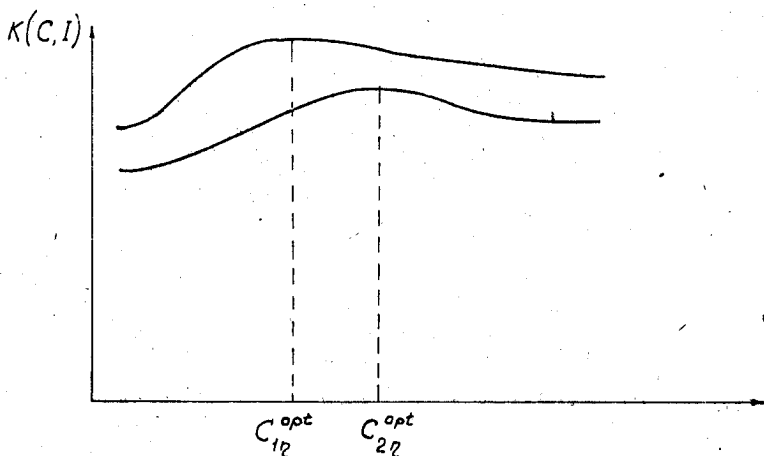


Рис. 48.

не в начале процесса обучения, что наблюдалось при использовании вероятностного критерия.

При  $C_r \rightarrow \infty$   $K(I, C) = 0$ .

При  $C_r \rightarrow 0$   $K(I, C) = \frac{1 - P_0}{2T} \log \left[ \frac{1 + P_0}{1 - P_0} \right]$ .

Таким образом, может быть сделан вывод о целесообразности применения информационных критериев, разработанных в [2].

Остановимся на частном случае синтеза средств обучения — синтезе тренажеров.

Предполагается, что перед началом обучения на тренажере обучаемым выдана информация, определяющая  $P_0$  — начальную вероятность обучения.

Применим к данной задаче теорему гипотез.

$H_1$  — гипотеза I (выполнение боевой задачи)

$$P(H_1) = P_0, \quad (77)$$

где  $P(H_1)$  — априорная вероятность выполнения боевой задачи.

$H_2$  — гипотеза II (невыполнение боевой задачи)

$$P(H_2) = 1 - P_0, \quad (78)$$

где  $P(H_2)$  — априорная вероятность невыполнения боевой задачи.

$A$  — событие, заключающееся в обучении оператора на тренажере;

$P(A/H_1)$  — вероятность обучения на тренажере при условии выполнения боевой задачи

$$P(A/H_1) = 1 - P_{\lambda}, \quad (79)$$

где  $P_{\lambda}$  — вероятность «ложных отказов», обусловленная конечной точностью алгоритма обучения, допусками на моделирование процессов и операций на тренажере и законами распределения погрешностей органов чувств человека;

$P(A/H_2)$  — вероятность обучения на тренажере при условии невыполнения боевой задачи.

$$P(A/H_2) = P_{\mu}, \quad (80)$$

где  $P_{\mu}$  — вероятность «необнаруженных отказов», обусловленная конечной точностью алгоритма обучения, допусками на моделирование процессов и операций на тренажере и законами распределения погрешностей органов чувств человека.

Применив формулу Байеса, получим

$$P(H_1/A) = \frac{P(H_1) \cdot P(A/H_1)}{\sum_{i=1}^2 P(H_i) \cdot P(A/H_i)}, \quad (81)$$

где  $P(H_1/A)$  — вероятность выполнения боевой задачи при условии обучения на тренажере.

С учетом равенств (77), (78), (79), (80), (81) можно записать окончательно

$$P = \frac{P_o (1 - P_{\lambda})}{P_o (1 - P_{\lambda}) + (1 - P_o) P_{\mu}} \quad (82)$$

Произведем оценку эффективности тренажера по обобщенному статистическому критерию (73).

С учетом равенств (74), (75), (70), (82) получим

$$\begin{aligned} \mathcal{E}(I, C) = & \frac{\left\{ \frac{2P_o (1 - P_{\lambda}) + (1 - P_o) P_{\mu}}{P_o (1 - P_{\lambda}) + (1 - P_o) P_{\mu}} \right\} \log 0,5 [\dots] +}{\left[ -(P_o + 1) \times \right.} \\ & \left. + \frac{(1 - P_o) P_{\mu}}{P_o (1 - P_{\lambda}) + (1 - P_o) P_{\mu}} \right] \log 0,5 [\dots] -} \\ & \frac{\times \log 0,5 (P_o + 1) -}{\left[ -(P_o + 1) \log 0,5 (P_o + 1) - \right.} \\ & \left. \left. - (1 - P_o) \times \right. \right. \end{aligned}$$



$$\leftarrow \dots \frac{-(1 - P_0) \log 0,5(1 - P_0) \cdot C_{r \min}}{\times \log 0,5(1 - P_0)} \cdot C_r \quad (83)$$

В данном случае нормирование может осуществляться относительно идеализированной аппаратуры, информационная способность которой максимальная

$$I_{\max} = -0,5(P_0 + 1) \log 0,5(P_0 + 1) - \\ -0,5(1 - P_0) \log 0,5(1 - P_0), \quad (84)$$

а стоимость минимальная —  $C_{r \min}$ .

Это, например, может быть стоимость пультов с установленными элементами (тумблеры, кнопки и т. д.), исключая стоимость монтажа, отладки и обучения.

$P_0$  и  $C_{r \min}$  — заданные величины;

$C_r, P_d, P_n$  — определяются в процессе проектирования.

Таким образом, может быть определена величина  $\mathcal{E}(I, C)$  для различных вариантов проектируемой аппаратуры и может быть выбран для серийного производства проект, для которого  $\mathcal{E}(I, C)$  является максимальным.

В данном случае задача синтеза решается через анализ.

Возможен и другой подход, когда величина  $\mathcal{E}(I, C)$  задается ТТЗ,  $P_0 = \text{const}$ ,  $C_{r \min} = \text{const}$ ,  $C_r$  определяется средствами, отпущенными на проектирование.

Может быть построена область допустимых значений для  $P_d$  и  $P_n$ , что является отправным пунктом при моделировании отдельных элементов и процессов:

$$P_{\text{но}} = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_{\text{но}i}]; \quad (85)$$

$$P_{\text{ло}} = 1 - \prod_{i=1}^m [1 - P_{\text{ло}i}]. \quad (86)$$

Проанализировав результаты исследования, можно сделать следующие выводы:

— универсальной оценкой степени обученности является вероятность обучения  $P_{\text{об}}$ , характеризующая способность выполнить поставленную задачу;

— информационные критерии наряду с большей чувствительностью в большей степени соответствуют физическому смыслу процесса обучения, чем вероятностные и, следовательно, могут быть рекомендованы для оценки эффективности системы обучения и средств обучения;

— синтез и оценку средств обучения предполагается осуществлять по обобщенному статистическому критерию с использованием вероятностей «ложных» и «необнаруженных» отказов.

## § 2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТЕПЕНИ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ

Степень обученности [10] может быть охарактеризована вероятностью  $P_{об}$  выполнения поставленной задачи обучаемым. Этой задачей может являться проведение технического обслуживания, отыскание и устранение неисправностей и т. п., причем степень обученности в каждом конкретном случае должна быть строго определенной. В этой связи представляет значительный интерес установление зависимости между вероятностью выполнения поставленной задачи (вероятностью обученности  $P_{об}$ ) и временем обучения или стоимостью обучения

$$P_{об} = F(C_r).$$

Пусть в момент времени  $t=0$  при затратах  $C_r=0$  начинается процесс обучения. Интересующая нас случайная величина  $C_r$  — стоимость обучения. Найдем функцию распределения случайной величины  $C_r$ . Очевидно, что при  $t < 0$   $C_r = 0$  и  $F(C_r) = 0$ .

$P(C_{r1}, C_{r2})$  — вероятность того, что обучение произойдет при затратах  $C_{r1} \leq C_r \leq C_{r2}$ .

$aq(C_{r1}, C_{r2})$  — вероятность того, что при этих же затратах обучение не осуществится.

Примем следующие допущения:

$P(C_0, C_r + C_0)$  — функция только стоимости и не зависит от начального отсчета времени  $t_0$ .

Для малых величин затрат  $P(C_r, C_r + \Delta C_r)$ , пропорциональна  $\Delta C_r$ , т. е.

$$P(C_r, C_r + \Delta C_r) = \lambda \Delta C_r, \quad (87)$$

где  $\lambda > 0$  — коэффициент пропорциональности.

Отсюда следует, что

$$q(C_r, C_r + \Delta C_r) = 1 - \lambda \Delta C_r. \quad (88)$$

Обучение в непересекающихся отрезках времени (затраченных средств) — сумь события независимые.

Если при затратах  $[0, C_r + \Delta C_r]$  не произойдет обучение, то имеет место совмещение двух событий: обучение не произошло при затратах  $[0, C_r]$  и не произошло при затратах  $[C_r, C_r + \Delta C_r]$ .

Таким образом, по аксиоме умножения вероятностей, получим

$$q(0, C_r + \Delta C_r) = q(0, C_r) \cdot q(C_r, C_r + \Delta C_r),$$

или

$$q(0, C_r + \Delta C_r) = q(0, C_r) [1 - \lambda \Delta C_r].$$

Отсюда

$$q(0, C_r + \Delta C_r) = q(0, C_r) - \lambda q(0, C_r) \Delta C_r,$$

или

$$\frac{q(0, C_r + \Delta C_r) - q(0, C_r)}{\Delta C_r} = -\lambda q(0, C_r).$$

Переходя к пределу при условии  $\Delta C_r \rightarrow 0$ , получаем

$$\frac{dq(0, C_r)}{dC_r} = -\lambda q(0, C_r).$$

Интегрируя полученное дифференциальное уравнение, найдем

$$q(0, C_r) = G e^{-\lambda C_r}. \quad (89)$$

Из очевидного начального условия  $q(0,0) = 1$  находим, что  $G=1$ .

Таким образом,

$$q(0, C_r) = e^{-\lambda C_r}. \quad (90)$$

и, следовательно,

$$F(C_r) = 1 - e^{-\lambda C_r}. \quad (91)$$

Обозначив  $\lambda = \frac{1}{T}$ , окончательно получим

$$P_{об} = 1 - e^{-\frac{C_r}{T}}, \quad (92)$$

где  $T$  — постоянная обучения.

Постоянная обучения является функцией нескольких переменных

$$T = f(\psi, s, \varepsilon, \varphi), \quad (93)$$

где  $\psi$  — количество изучаемого материала;

$s$  — сложность изучаемого материала;

$\varepsilon$  — способности обучаемого;

$\varphi$  — методика обучения.

Экспериментальные данные показывают, что чем сложнее материал, чем большее его количество, тем больше постоянная обучения  $T$  и тем более пологой является зависимость  $P_{об}$  от  $C_r$  (рис. 49).

Чем выше индивидуальные способности обучаемого и чем лучше методики обучения, тем меньше постоянная  $T$  и тем более крутой является зависимость  $P_{об}$  от  $C_r$ .

Установление аналитической зависимости для постоянной обучения  $T$  может явиться темой специального исследования.

Обучение не является самоцелью, а предназначено дать обучаемому необходимую сумму знаний для успешного выполнения определенной работы.

Общая схема решения данной задачи представлена на рис. 50.

На этом рисунке обозначено:

$X_1, X_2, \dots, X_n$  — необходимая сумма знаний по отдельным дисциплинам;

$N$  — конечная выгода, выраженная в единицах счета денег.

Стоимость обучения  $C_r$ , с одной стороны, через  $P_{об}$  и выполняемую работу приведет к увеличению выгоды  $N$ . С другой сторо-

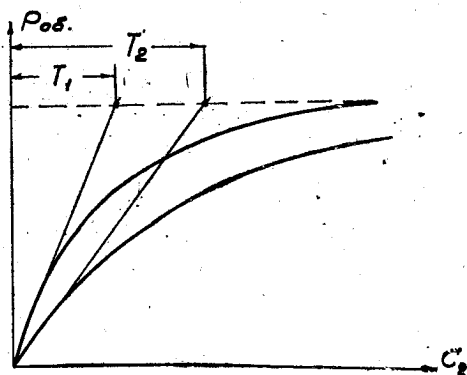


Рис. 49.

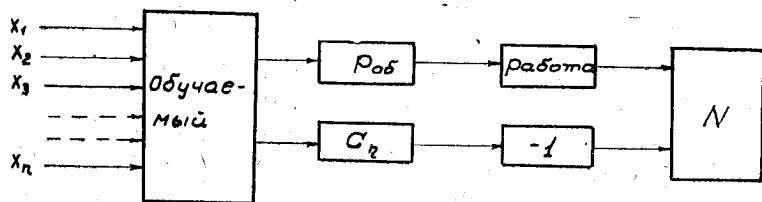


Рис. 50.

ны, стоимость обучения  $C_r$  с отрицательным знаком входит в значение выгоды  $N$  и, следовательно, непосредственно уменьшает последнюю. Таким образом, становится очевидным, что данная задача требует оптимизации.

Ниже представлена методика оптимизации распределения средств с учетом стоимости обучения.

Структурная схема решения данной задачи изображена на рис. 51, где приняты следующие обозначения:

$C$  — общее количество средств (в денежных единицах);

$C_1$  — стоимость материальной части;

$C_2$  — стоимость обучения обслуживающего персонала;

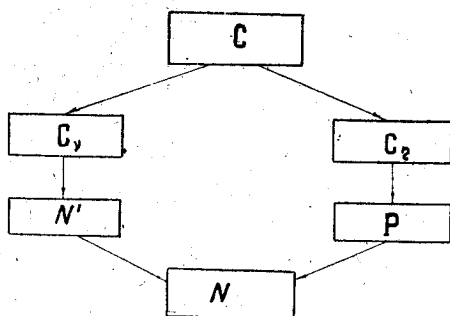


Рис. 51.

$P$  — вероятность выполнения поставленной задачи;

$N'$  — количество единиц материальной части, выполняющих задачу;

$N$  — количество единиц материальной части, выполнивших задачу (выгода):

$$N' = \frac{C_1}{C_N}, \quad (94)$$

где  $C_N$  — стоимость единицы материальной части.

Для вероятности выполнения поставленной задачи может быть записана формула

$$P = \frac{P_p}{1 - P_{пр}(1 - P_p)}, \quad (95)$$

где  $P_p$  — вероятность готовности материальной части к работе до ее проверок;

$P_{пр}$  — вероятность обнаружения и устранения неисправностей, обусловленная конструктивным исполнением аппаратуры и обученностью обслуживающего персонала:

$$P_{пр} = P_a \cdot P_{об}, \quad (96)$$

где  $P_a$  — вероятность обнаружения неисправностей аппаратурой (для изготовленного оборудования  $P_a = \text{const}$ ).

Количество единиц материальной части, выполнивших задачу, определится по формуле

$$N = N' \cdot P. \quad (97)$$

Из формул (92), (94), (95), (96), (97) получим

$$N = \frac{C_v}{C_N} \cdot \frac{P_p}{1 - P_a(1 - \exp\left\{\frac{C_v - C}{T}\right\})(1 - P_p)}. \quad (98)$$

Максимальной выгодой в данном случае является максимальное количество единиц материальной части, выполнивших задачу  $N_{\max}$ .

Следовательно, задача сводится к исследованию уравнения (98) на максимум относительно  $C_v$  или  $C_r$ , так как

$$C_r = C - C_v.$$

Опуская промежуточные преобразования, получим

$$\frac{dN}{dC_v} = T \ln \frac{P_a(1 - P_p)(C_v - P_p T)}{P_p \cdot T [1 - P_a(1 - P_p)]} + C_v - C = 0. \quad (99)$$

Уравнение (99) аналитически относительно  $C_v$  неразрешимо. Возможно член

$$T \ln \frac{P_a(1 - P_p)(C_v - P_p T)}{P_p \cdot T [1 - P_a(1 - P_p)]}$$

разложить в ряд Маклорена относительно  $C_v$  и затем с любой степенью точности решить полученное алгебраическое уравнение.

В целях простоты и наглядности на рис. 52 приводится графическое решение уравнения (99).

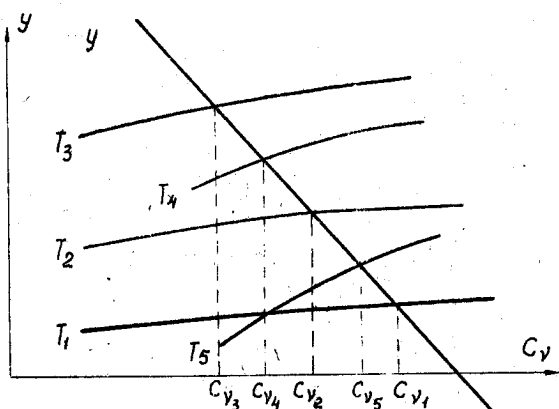


Рис. 52.

На графике представлено несколько решений для различных значений постоянной обучения  $T$ . Причем по мере увеличения по-

стоянной  $T$  сначала наблюдается уменьшение и затем — увеличение.

Это значит, что с увеличением сложности обучения для обеспечения  $N_{\max}$  количество средств, вкладываемых в обучение, сначала должно увеличиваться и затем, начиная с некоторого момента, должно уменьшаться. График, выражающий эту зависимость, представлен на рис. 53.

Из графика видно, что при некотором значении  $T = T_{кр}$  стоимость обучения  $C_t = 0$ . Это значит, что для заданных  $C, P_p, P_a$

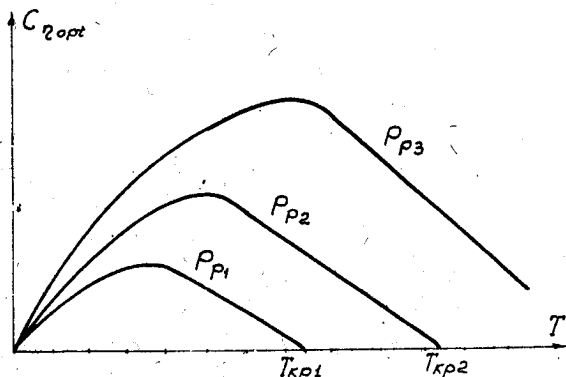


Рис. 53.

и  $T_{кр}$  целесообразно все средства вложить в производство материальной части, сделав последнюю необслуживаемой.

Формула для определения критического значения постоянной обучения  $T_{кр}$  может быть получена из уравнения (99), если выражение под логарифмом приравнять единице:

$$T_{кр} = \frac{P_a}{P_p} (1 - P_p) C. \quad (100)$$

График, выражающий эту зависимость, представлен на рис. 54, откуда видно, что с увеличением надежности аппаратуры  $P_p$  критическое значение постоянной обучения  $T_{кр}$  уменьшается. На этом же рисунке представлена зависимость оптимального значения вероятности обучения  $P_{об}$  от постоянной обучения  $T$ . С увеличением сложности изучаемого материала оптимальное значение  $P_{об\,opt}$  должно уменьшаться.

### § 3. ПОЛУЧЕНИЕ АПРИОРНЫХ ОЦЕНОК И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОБУЧЕНИЯ

В некоторых случаях функционирования систем оператор — СКУ исключительно важной становится задача получения априорных оценок, характеризующих пригодность человека к выполнению своих функций в системе.

В [9] показано, что обучение должно рассматриваться как составная часть общей решаемой задачи, включающей как создание аппаратуры, так и ее обслуживание. При этом оптимальной системе будет соответствовать вполне определенная степень обученности обслуживающего персонала. Таким образом, возникает задача

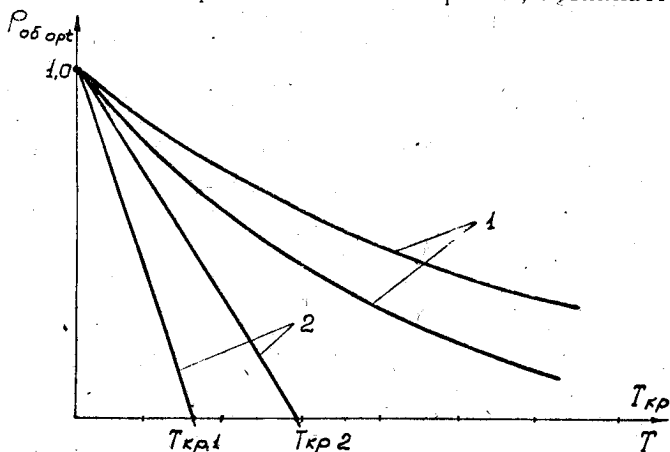


Рис. 54.

получения априорных оценок и прогнозирования обучения, обеспечивающих оптимальное функционирование системы оператор — СКУ.

В [9] рассматриваются интуитивные модели получения априорных оценок, учитывающие предысторию обучения. Статистика оценок может быть записана в виде матрицы

$$A = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \dots & \dots & \alpha_{1n-1} & \alpha_{1n} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \dots & \dots & \alpha_{2n-1} & \alpha_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{k1} & \alpha_{k2} & \dots & \dots & \dots & \alpha_{kn-1} & \alpha_{kn} \\ \alpha_{k+1,1} & \alpha_{k+1,2} & \dots & \dots & \dots & \alpha_{k+1,n-1} & \alpha_{k+1,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \dots & \dots & \dots & \alpha_{mn-1} & \alpha_{mn} \end{vmatrix}, \quad (101)$$

где  $\alpha_{ij}$  — оценка  $i$ -го обучаемого по  $j$ -му предмету;  
 $\alpha_{ij} (i=1, \dots, k-1; j=1, \dots, m)$  — известные оценки, характеризующие предысторию обучения  
 $\alpha_{ij} (i=k, \dots, m; j=1, \dots, n-1)$  ( $m=k+l$ );



$\alpha_{in}$  ( $i = k, k + 1, \dots, m$ ) — оценки  $i$ -х обучаемых по  $n$ -му предмету, которые требуется определить априори.

В основе интуитивных моделей лежат следующие утверждения: если  $i$  хорошо успевал по  $(n-1)$  предметам, то  $\alpha_{in}$  следует ожидать большой; и если большой процент обучающихся хорошо успевал по  $n$ -му предмету, то  $\alpha_{in}$  должна быть большой. При этом используются три параметра в качестве показателей развития умственных способностей обучаемого и трудностей предмета:

- 1)  $\mu_i$  — математическое ожидание оценок  $i$ -го обучаемого по  $(n-1)$  предметам

$$\mu_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \alpha_{ij}; \quad (102)$$

- 2)  $\nu_n$  — математическое ожидание оценок  $(k-1)$  обучаемых по  $n$ -му предмету

$$\nu_n = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} \alpha_{in}; \quad (103)$$

- 3)  $\beta$  — математическое ожидание оценок  $(k-1)$  обучаемых по  $n$  предметам

$$\beta = \frac{1}{n(k-1)} \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij}. \quad (104)$$

Используя эти три параметра, предположим существование следующих четырех свойств  $\alpha_{ij}$ , удовлетворяющих интуитивным понятиям, касающимся интеллекта обучаемого и трудности изучаемого предмета:

$$\alpha_{in} \geq \nu_n \quad \text{при} \quad \mu_i > \beta;$$

$$\alpha_{in} = \nu_n \quad \text{при} \quad \mu_i = \beta;$$

$$\alpha_{in} \leq \nu_n \quad \text{при} \quad \mu_i < \beta.$$

Это требование может быть интерпретировано как утверждение того, что если  $i$  является обучаемым выше среднего, среднего или ниже среднего уровня, то его ожидаемая оценка по  $n$ -му предмету должна быть выше, равна или меньше средней оценки  $(k-1)$  обучаемых по  $n$ -му предмету:

$$\alpha_{in} \geq \mu_i \quad \text{при} \quad \nu_n > \beta;$$

$$\alpha_{in} = \mu_i \quad \text{при} \quad \nu_n = \beta;$$

$$\alpha_{in} \leq \mu_i \quad \text{при} \quad \nu_n < \beta.$$

Данное условие может быть сформулировано как утверждение того, что если  $n$  является более легким, средним или более трудным предметом, то ожидаемая оценка  $i$ -го обучаемого должна быть больше, равна или меньше, чем его усредненная оценка по  $(n-1)$  предметам:

$$\frac{\partial \alpha_{in}}{\partial \mu_i} \geq 0$$

для всех  $\mu_i, \nu_n, \beta$ .

Это свидетельствует о том, что  $\alpha_{in}$  не должна уменьшаться по мере развития умственных способностей  $i$ -го обучаемого:

$$\frac{\partial \alpha_{in}}{\partial \nu_n} \geq 0$$

для всех  $\mu_i, \nu_n, \beta$ .

Это подразумевает, что  $\alpha_{in}$  не должна никогда уменьшаться по мере уменьшения трудности  $n$ -го предмета.

Интуитивная модель, удовлетворяющая перечисленным выше требованиям, описывается уравнением

$$\alpha_{in}^* = \begin{cases} \frac{\mu_i \cdot \nu_n}{\beta} & (\mu_i \leq \beta) \\ \alpha^{\max} - \frac{(\alpha^{\max} - \mu_i)(\alpha^{\max} - \nu_n)}{(\alpha^{\max} - \beta)} & (\mu_i \geq \beta), \end{cases} \quad (105)$$

где  $\alpha_{in}^*$  — априорная оценка  $i$ -го обучаемого по  $n$ -му предмету;

$\alpha^{\max}$  — основание системы оценок (максимальная оценка).

Например, при вероятностных оценках  $\alpha^{\max} = 1$ .

К недостаткам модели можно отнести то, что оценка  $i$ -го обучаемого по  $n$ -му предмету не зависит от трудности изучаемых предметов в прошлом. Это замечание является в основном критикой в отношении неполноты предыстории обучения, которая используется в моделях. Из этих соображений было бы желательным выполнение дополнительного требования.

Если два обучаемых  $i_1$  и  $i_2$  имеют идентичные данные по обучению на предыдущем этапе, за исключением того, что  $i_1$  имеет выше оценку по  $j_1$ , а  $i_2$  — по  $j_2$ , то  $\alpha_{i_1 n}$  должна быть выше, чем  $\alpha_{i_2 n}$ , если  $j_1$  более трудный предмет, чем  $j_2$ .

Модель, в которой удалось бы реализовать пятое требование, в значительной степени снизила бы неопределенность или энтропию определяемых оценок.

Припишем каждому предмету  $j$  свой вес  $\lambda_j$ , характеризующий его трудность и степень влияния на получение оценки  $\alpha_{in}^*$ . В этом случае матрица  $A$  преобразуется в матрицу  $C$ :

$$C = A \cdot D = \|\| \alpha_{ij} \|\| \cdot \|\| \lambda_j \delta_{ij} \|\|, \quad (106)$$

где  $D = \|\| \lambda_j \delta_{ij} \|\|$  — диагональная матрица из весовых коэффициентов  $\lambda_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ),  $\lambda_n = 1$ ;

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{если } i \neq j \end{cases} \quad \text{— символ Кронекера.}$$

Определим из матрицы  $C$  параметры  $\mu_i^\lambda$ ,  $\nu_n^\lambda$  и  $\beta^\lambda$ :

$$\mu_i^\lambda = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} \lambda_j \alpha_{ij}; \quad (107)$$

$$\nu_n^\lambda = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^{k-1} \lambda_n \alpha_{in}; \quad (108)$$

$$\beta^n = \frac{1}{n(k-1)} \sum_i^{k-1} \sum_j^n \lambda_j \alpha_{ij}. \quad (109)$$

Подставляя выражения (107), (108), (109) в формулу (105), для априорных оценок окончательно получим

$$\alpha_{in}^* = \begin{cases} \frac{n \sum_j^{n-1} \lambda_j \alpha_{ij} \cdot \sum_i^{k-1} \lambda_n \alpha_{in}}{(n-1) \sum_i^{k-1} \sum_j^n \lambda_j \alpha_{ij}} & \text{— для } \mu_i \leq \beta, \\ \frac{\alpha^{\max}(n-1) \left[ \alpha^{\max} n(k-1) \sum_i^{k-1} \sum_j^n \lambda_j \alpha_{ij} \right]}{(n-1) \left[ \alpha^{\max} n(k-1) - \right.} & \dots \rightarrow \\ \left. n - \left[ \alpha^{\max}(n-1) - \sum_j^{n-1} \lambda_j \alpha_{ij} \right] \cdot \left[ \alpha^{\max}(k-1) - \sum_i^{k-1} \lambda_n \alpha_{in} \right]}{\left. - \sum_i^{k-1} \sum_j^n \lambda_j \alpha_{ij} \right]} & \leftarrow \dots \\ \text{— для } \mu_i \geq \beta. \end{cases} \quad (110)$$

Таким образом, на основании формулы (110) может быть получен вектор-столбец

$$\alpha^* = \begin{pmatrix} \alpha_{kn}^* \\ \alpha_{k+1, n}^* \\ \dots \\ \alpha_{k+l, n}^* \end{pmatrix} \quad (111)$$

априорных оценок  $l$  обучаемых по  $n$ -му предмету.

В результате реализация  $n$ -го события определится вектор-столбец

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{kn} \\ \alpha_{k+1, n} \\ \dots \\ \alpha_{k+l, n} \end{pmatrix} \quad (112)$$

апостериорных оценок  $l$ , обучаемых по  $n$ -му предмету.

Достоверность прогнозирования может быть оценена статистическим коэффициентом корреляции между двумя векторами  $\alpha^*$  и  $\alpha$  по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=k}^{k+l} (\alpha_{in} - \bar{\alpha}) (\alpha_{in}^* - \bar{\alpha}^*)}{\sqrt{\sum_{i=k}^{k+l} (\alpha_{in} - \bar{\alpha})^2 \cdot \sum_{i=k}^{k+l} (\alpha_{in}^* - \bar{\alpha}^*)^2}} \quad (113)$$

где

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l+1} \sum_{i=k}^{k+l} \alpha_{in}, \quad \bar{\alpha}^* = \frac{1}{l+1} \sum_{i=k}^{k+l} \alpha_{in}^* \quad (114)$$

— статистические математические ожидания случайных величин  $\alpha$  и  $\alpha^*$  соответственно.

В общем случае статистический коэффициент корреляции является нелинейной функцией весовых коэффициентов  $\lambda_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ):

$$r = f(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (115)$$

и может рассматриваться как функция, выражающая критерий оптимальности.

Такие задачи относятся к нелинейному планированию. В математическом отношении задача нелинейного планирования заключается в определении значений переменных

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n,$$

при которых критерий оптимальности, являющийся нелинейной функцией переменных, имеет максимальную величину при условии, что переменные  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  принимают лишь положительные значения

$$\lambda_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (116)$$

и выполняется ограничение

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}^*. \quad (117)$$

Данная задача может быть решена методом случайных испытаний (методом Монте-Карло) или градиентными методами.

Предложенная модель, основанная на интуитивных соображениях, заключенных в (105) и использующая нормированный статистический коэффициент корреляции как критерий оптимальности, может быть названа интуитивной корреляционной моделью.

Получение значения весовых коэффициентов необходимо использовать при определении априорных оценок по формуле (110) и прогнозировании обучения для последующих групп обучаемых. При этом на каждом этапе необходимо уточнение самих весовых коэффициентов  $\lambda_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Оценка точности прогнозирования может производиться по формуле

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{1}{l+1} \sum_{i=k}^{k+l} (\alpha_{in} - \alpha_{in}^*)^2} \quad (118)$$

#### § 4. СИНТЕЗ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕЛОВЕКА

В обширном комплексе исследований [10] системы оператор — СКУ одной из проблем является отбор, обучение и тренировка людей для работы на аппаратуре [11], [12]. Сюда входят задачи разработки адекватных методик отбора кандидатов и создания специальной аппаратуры для обучения и тренировки (тренажеры, стенды, модели — заменители натуральных испытаний и т. п.).

В [11] предлагается в план Совета по комплексной проблеме «Кибернетика» при Президиуме АН СССР включить вопросы обучения человека работе с машиной, исследования вопросов комплексного использования анализаторов, исследования в области уни-

фицированных тренажеров и теории обучения и др. Все это свидетельствует о том, что постановка данной проблемы вызвана требованиями настоящей действительности, является актуальной и заслуживает пристального внимания.

Проектирование аппаратуры должно включать как составную часть разработку информационной модели [12], которая должна отображать состояние внешней среды управляемых объектов и работу системы управления и представлять собой данные, необходимые оператору для принятия решений.

Данная модель может быть названа информационной моделью I рода, в отличие от тренажера— информационной модели II рода.

Вопрос о построении информационных моделей изучен далеко недостаточно, и наиболее слабым местом в этой проблеме является обоснование точности моделирования. Как правило, фигурируют качественные характеристики (такие как — тренажер должен быть «максимально похожим» на реальную аппаратуру и т. п.).

В параграфе синтез тренажеров рассматривается как информационная задача преобразования информации, где точность преобразования определяется психофизиологическими характеристиками человека.

На рис. 55 в общем виде представлен процесс синтеза тренажера как информационной модели II рода [2], где:

$X(x_1, t, \tau) = (x_1, x_2, \dots, x_n, t, \tau)$  — многомерный случайный вектор,

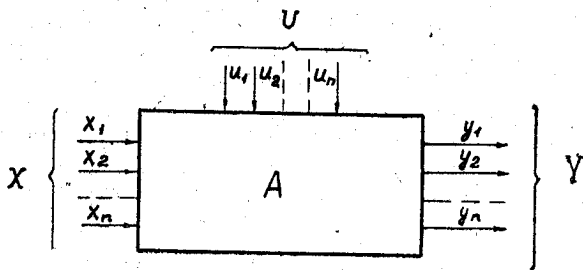


Рис. 55.

характеризующий реальную аппаратуру (параметры, характеристики, процессы).

$Y(y_1, t, \tau) = (y_1, y_2, \dots, y_n, t, \tau)$  — многомерный случайный вектор, характеризующий тренажер (параметры, характеристики, процессы).

$U(u_1, t, \tau) = (u_1, u_2, \dots, u_n, t, \tau)$  — многомерный случайный вектор, характеризующий погрешности синтеза тренажера.

Таким образом, синтез информационной модели II рода сводится к преобразованию  $n$ -мерного вектора  $X(x^1, t, \tau)$  в  $n$ -мерный вектор  $Y(y^1, t, \tau)$ . Процесс преобразования протекает во времени до некоторой степени однородно и может в первом приближении считаться стационарным, так как отдельные реализации процесса

колеблются вокруг постоянных во времени средних значений с постоянной во времени дисперсией.

Интересно рассмотреть два случая [2]:

1) когда имеет место точное, но с запаздыванием на  $\tau_3$  воспроизведение стационарного случайного процесса

$$Y(y_i, t, \tau) = X(x_i, t - \tau_3, \tau); \quad (119)$$

2) когда выходной процесс воспроизводится без запаздывания, но действует вектор помехи  $U(u_i, t, \tau)$ , не зависящий от входного процесса

$$Y(y_i, t, \tau) = X(x_i, t, \tau) + U(u_i, t, \tau). \quad (120)$$

Как будет показано ниже, под помехами в данном случае понимаются погрешности органов чувств человека. Среднее количество информации, полученное при переводах векторов, можно определить по формуле

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int f(X, Y, t, \tau) \times \\ \times \log_2 \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(X, t, \tau) \cdot f(Y, t, \tau)} dX dY, \quad (121)$$

где  $f(X, Y, t, \tau)$  — совместный дифференциальный закон распределения  $X$  и  $Y$ ;

$f(X, t, \tau)$  — дифференциальный закон распределения вектора  $X$ ;

$f(Y, t, \tau)$  — дифференциальный закон распределения вектора  $Y$ .

Выполнив некоторые преобразования, формулу (121) представим в виде

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = H(X, t, \tau) - m_y [H_y(X, t, \tau)], \quad (122)$$

или

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = H(Y, t, \tau) - m_x [H_x(Y, t, \tau)], \quad (123)$$

где

$$H(X, t, \tau) = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int f(X, t, \tau) \log_2 f(X, t, \tau) dX \quad (124)$$

— априорная энтропия вектора  $X$ ;

$$[m_y H_y(X, t, \tau)] = - \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int f(X, Y, t, \tau) \times \\ \times \log_2 f_y(X, t, \tau) dX dY \quad (125)$$

— усредненное по выходным параметрам значение энтропии после получения вектора  $Y$ ;

$f_y(X, t, \tau)$  — условный дифференциальный закон распределения вектора  $X$  при получении вектора  $Y$

$$f_y(X, t, \tau) = \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(Y, t, \tau)}. \quad (126)$$

Формулы, определяющие среднее количество информации при одномерной передаче  $X_1 \rightarrow Y_1$ , как по виду, так и по содержанию аналогичны формулам (121) ÷ (126).

При нормальном распределении векторов  $X$  и  $Y$ :

$$f(X, t, \tau) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(X - m_x)^2}{2\sigma_x^2} \right\}; \quad (127)$$

$$f(Y, t, \tau) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{(Y - m_y)^2}{2\sigma_y^2} \right\} \quad (128)$$

находим

$$\begin{aligned} \log_2 \frac{f(X, Y, t, \tau)}{f(X, t, \tau) \cdot f(Y, t, \tau)} &= \log_2 \frac{1}{\sqrt{1-r^2}} - \\ &- \frac{r^2 \log_2 l}{2(1-r^2)} \left[ \frac{(X - m_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2(X - m_x)(Y - m_y)}{r\sigma_x\sigma_y} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{(Y - m_y)^2}{\sigma_y^2} \right]. \end{aligned} \quad (129)$$

Подставляя выражения (127), (128), (129) в формулу (121), получим после некоторых преобразований

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = \log_2 \frac{1}{\sqrt{1 - r_{xy}^2(t, \tau)}}, \quad (130)$$

где

$$\begin{aligned} r_{xy}(t, \tau) &= \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int (X - m_x)(Y - m_y) \times \\ &\quad \times f(X, Y, t, \tau) dX dY \end{aligned} \quad (131)$$

— коэффициент корреляции векторов  $X$  и  $Y$ ;

$\sigma_x^2(t, \tau)$ ;  $\sigma_y^2(t, \tau)$  — дисперсия векторов  $X$  и  $Y$ .

Энтропия  $n$ -мерного случайного вектора  $X(x_1, t, \tau)$ , имеющего нормальный закон распределения, может быть представлена в виде

$$H(X, t, \tau) = \log_2 \sqrt{(2\pi e)^n |R^{xx}|}. \quad (132)$$

Среднее количество информации при преобразовании  $X \rightarrow Y$  можно выразить через корреляционные матрицы



$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 \frac{|R|}{|R^{xx}| + |R^{yy}|}, \quad (133)$$

где

$$R^{xx} = \begin{bmatrix} R_{11}^{xx} & \dots & R_{1n}^{xx} \\ R_{21}^{xx} & \dots & R_{2n}^{xx} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{n1}^{xx} & \dots & R_{nn}^{xx} \end{bmatrix}; \quad R^{yy} = \begin{bmatrix} R_{11}^{yy} & \dots & R_{1n}^{yy} \\ R_{21}^{yy} & \dots & R_{2n}^{yy} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{n1}^{yy} & \dots & R_{nn}^{yy} \end{bmatrix}; \quad (134)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_{11}^{xx} & R_{1n}^{xx} R_{11}^{xy} & R_{1n}^{xy} \\ \dots & \dots & \dots \\ R_{n1}^{xx} & \dots & R_{nn}^{xx} R_{n1}^{xy} & \dots & R_{nn}^{xy} \\ R_{11}^{xy} & \dots & R_{1n}^{xy} R_{11}^{yy} & \dots & R_{1n}^{yy} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1}^{xy} & \dots & R_{nn}^{xy} R_{n1}^{yy} & \dots & R_{nn}^{yy} \end{bmatrix} \quad (135)$$

$|R|$ ,  $|R^{xx}|$ ,  $|R^{yy}|$  — корреляционные определители, соответствующие корреляционным матрицам, составленным из корреляционных моментов:

$$R_{\nu\mu}^{xx} = m [(X_\nu - m_{X\nu})(X_\mu - m_{X\mu})]; \quad (136)$$

$$R_{\nu\mu}^{yy} = m [(Y_\nu - m_{Y\nu})(Y_\mu - m_{Y\mu})]; \quad (137)$$

$$R_{\nu\mu}^{xy} = m [(X_\nu - m_{X\nu})(Y_\mu - m_{Y\mu})]. \quad (138)$$

При независимых компонентах вектора

$$R_{\nu\mu}^{xx} = \begin{cases} \sigma_\nu^2 & \text{при } \nu = \mu; \\ 0 & \text{при } \nu \neq \mu, \end{cases}$$

а энтропия вектора

$$H(X, t, \tau) = \log_2 \sigma_1 \sqrt{2\pi l} + \dots + \log_2 \sigma_n \sqrt{2\pi l}. \quad (139)$$

Из теории статистики известно, что степень связи между случайными векторами характеризуется корреляционной функцией. Если выходной вектор  $Y(t, \tau)$  не связан с характеристикой входного вектора  $X(t, \tau)$ , то  $R_{\nu\mu}^{xy} = 0$  и количество информации о векторе  $X(t, \tau)$ , получаемое по состоянию вектора  $Y(t, \tau)$ ,  $I(X \rightarrow Y, t, \tau) = 0$ . Если вектор  $Y(t, \tau)$ , характеризующий тренажер, получен с учетом всех характеристик вектора  $X(t, \tau)$ , отображаю-

шего реальную аппаратуру, то тренажер дает как угодно много информации о реальной аппаратуре.

При учете всех характеристик вектора  $X(t, \tau)$  коэффициент корреляции  $r_{xy}(t, \tau) \rightarrow 1$ ; следовательно, как это видно из формулы,

$$I(X \rightarrow Y, t, \tau) \rightarrow \infty.$$

Для одномерного преобразования формула (130) обращается в формулу

$$I(x_1 \rightarrow Y_1, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 [1 - r^2(t, \tau)], \quad (140)$$

где

$$r(t, \tau) = \frac{R_{11}^{xx}(t, \tau)}{\sigma_x(t, \tau) \cdot \sigma_y(t, \tau)}$$

— коэффициент корреляции.

Рассмотрим наиболее интересные случаи, ограничиваясь одномерным преобразованием.

При запаздывании воспроизведения

$$Y(t, \tau) = x(t + \tau_3, \tau); \quad (141)$$

$$r(t, \tau) = \frac{1}{\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int [x(t) - m_x] [x(t + \tau_3) - m_x] f(x, y, t, \tau) dx dy, \quad (142)$$

или окончательно

$$r(t, \tau) = \frac{R(\tau_3)}{R(0)}, \quad (143)$$

где  $R(\tau_3)$  — корреляционная функция центрированной случайной величины;

$R(0) = \sigma^2$  — дисперсия.

Количество получаемой при этом информации

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) = -\frac{1}{2} \log_2 \left[ 1 - \frac{R^2(\tau_3)}{R^2(0)} \right]. \quad (144)$$

Так как

$$0 \leq \frac{R(\tau_3)}{R(0)} < 1 \quad \text{при } \tau_3 > 0,$$

то

$$\infty > I(x \rightarrow y, t, \tau) \geq 0.$$

Из теории статистики известно, что если

$$\tau_3 \rightarrow \infty, \text{ то } R(\tau_3) \rightarrow 0$$

и

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) \rightarrow 0.$$

Вектор  $Y(t, \tau)$  практически не дает информации о состоянии вектора  $X(t, \tau)$ , если он представляет последний со сколько угодно большой задержкой  $\tau_3$ . Это можно интерпретировать следующим образом. Если тренажер вводится в эксплуатацию с задержкой  $\tau_3$  относительно реальной аппаратуры, то при этом наблюдается потеря информации, обуславливающая снижение эффективности использования тренажера. При  $\tau_3 \rightarrow \infty$  потери информации будут настолько большими, что эффективность будет стремиться к нулю. Практически полная потеря информации будет наблюдаться на интервале корреляции

$$T = \frac{1}{R(0)} \int_0^{\infty} R(\tau) d\tau, \quad (145)$$

который может быть определен из следующих соображений:

$$T = t_k - \tau_0, \quad (146)$$

где  $\tau_0$  — начальный отсчет времени;

$t_k$  — момент снятия аппаратуры с вооружения.

Проведенный анализ показывает, что тренажер должен вводиться в эксплуатацию одновременно с реальной аппаратурой. Только при этом условии будет получено максимальное количество информации и эффективность использования тренажера будет максимальной.

При наличии помех и нормальном распределении параметров  $X, Y$ :

$$Y(t, \tau) = x(t, \tau) + u(t, \tau); \quad (147)$$

$$\sigma_y^2(t, \tau) = \sigma_x^2(t, \tau) + \sigma_u^2(t, \tau); \quad (148)$$

$$\begin{aligned} r(t, \tau) &= \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)(y - m_y) f(x, y, t, \tau) dx dy = \\ &= \frac{\sigma_x^2}{\sigma_x^2 \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sigma_u^2}{\sigma_x^2}}}. \end{aligned} \quad (149)$$

Среднее количество информации, получаемое при преобразовании  $x \rightarrow y$ :

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) = \frac{1}{2} \log_2 \frac{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}{\sigma_u^2}. \quad (150)$$

Преобразование не дает информации при сколь угодно малой точности перевода входного вектора  $X(t, \tau)$  в выходной вектор  $Y(t, \tau)$ .

При  $\sigma_u \gg \sigma_x$ .

$$\frac{\sigma_x^2 + \sigma_u^2}{\sigma_u^2} \rightarrow 1.$$

Следовательно

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) \rightarrow 0.$$

Преобразование способно дать сколь угодно много информации при сколь угодно высокой точности перевода входного вектора  $X(t, \tau)$  в выходной вектор  $Y(t, \tau)$ .

Если

$$\sigma_u \ll \sigma_x,$$

то

$$\frac{\sigma_x^2}{\sigma_u^2} + 1 \rightarrow \infty.$$

Следовательно, согласно (150)

$$I(x \rightarrow y, t, \tau) \rightarrow \infty.$$

Однако увеличение точности преобразования сопряжено с увеличением стоимости. Поэтому точность преобразования должна быть выбрана из соображений минимальной стоимости и требуемой эффективности (необходимого количества информации). Это требование будет выполнено, если погрешностями преобразования считать психофизиологические характеристики человека: дифференциальные законы распределения абсолютных и разностных порогов различения  $f(a)$ ,  $f(d)$ , пропускной способности  $f(c)$  и т. п.

В этом случае требуемое количество информации может быть вычислено по формуле (150), а дисперсии параметров тренажера — по формуле (148).

Тренажер, удовлетворяющий этим условиям, будет способен дать количество информации того же порядка, что и реальная аппаратура при значительно меньшей стоимости, обусловленной большими допусками на проектирование.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Синтез тренажера можно рассматривать как задачу построения информационной модели II рода, являющейся отображением реальной аппаратуры.

2. Максимальная эффективность использования может быть достигнута при вводе тренажера в эксплуатацию одновременно с основной аппаратурой.

3. Допуски на проектирование тренажера должны быть обусловлены психофизиологическими характеристиками человека.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Ф. Ломов, Человек и техника, Советское радио, 1966.
2. И. В. Кузьмин, Оценка эффективности автоматических систем контроля и управления, ХВКИУ, 1966.
3. И. В. Кузьмин, Проектирование ТМ систем контроля и управления, Часть I, Синтез телемеханических структур, ХВКИУ, 1967.
4. И. В. Кузьмин, Теоретические основы информационной техники, ХВКИУ, 1969.
5. П. Б. Невельский, Объем памяти и количества информации, Сб. «Проблемы инженерной психологии», вып. 3, изд. «Общество психологов», Л., 1965.
6. Р. Буш, Ф. Мостеллер, Статические модели обучаемости, ФМ, 1962.
7. Д. Ритард, Смоллвуд, Структура выбора решений для обучающих машин, КВИРТУ, 1966.
8. Н. А. Шишонов, Некоторые статические критерии оценки программированного обучения и контролируемых машин, КВИРТУ, 1964.
9. В. И. Ключко, Получение априорных оценок и прогнозирование обучения, Вопросы военно-инженерной психологии, вып. 2, ХВКИУ, 1968.
10. И. В. Кузьмин, В. И. Ключко, Синтез средств обучения с учетом психофизиологических характеристик человека, Вопросы военно-инженерной психологии, вып. 1, ХВКИУ, 1968.
11. М. Г. Гаазе-Рапопорт и др., Общие проблемы и задачи исследования системы «человек — автомат», Под редакцией Ошанина Д. А., «Наука», 1965.
12. В. П. Зинченко, Д. Ю. Панов, Игровые системы управления и информационные модели. Система «человек и автомат», «Наука», 1965.
13. М. А. Казаринов, Основы военно-инженерной психологии, ХВКИУ, 1970.
14. Г. Е. Березняков, М. А. Казаринов, Б. А. Смирнов, Основы военно-инженерной психологии (лабораторный практикум), ХВКИУ, 1970.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение . . . . .	3
<b>Глава I. Человек как звено системы контроля и управления . . . . .</b>	<b>5</b>
§ 1. Структура систем „человек — машина“ . . . . .	5
§ 2. Время цикла контроля и управления . . . . .	7
§ 3. Точность работы оператора . . . . .	10
§ 4. Надежность работы оператора . . . . .	13
<b>Глава II. Анализаторы человека . . . . .</b>	<b>16</b>
§ 1. Анализатор, его строение и функции . . . . .	17
§ 2. Чувствительность анализаторов . . . . .	18
§ 3. Избирательность анализатора . . . . .	21
§ 4. Общие требования к сигналам в системах контроля и управления . . . . .	22
§ 5. Зрение . . . . .	23
§ 6. Слух . . . . .	26
§ 7. Другие виды чувствительности . . . . .	28
§ 8. Взаимодействующие анализаторов . . . . .	31
<b>Глава III. Эффективность приема, передачи и хранения информации оператором . . . . .</b>	<b>34</b>
§ 1. Функциональная модель SKU и оператора . . . . .	34
§ 2. Потенциальная модель SKU — оператор . . . . .	36
§ 3. Реальная модель SKU — оператор . . . . .	39
§ 4. Способность оператора принимать, передавать и хранить информацию . . . . .	41
<b>Глава IV. Индикатор и пульт управления как средство сопряжения оператора с системой контроля и управления . . . . .</b>	<b>49</b>
§ 1. Критерии психологической оценки . . . . .	49
§ 2. Стрелочные индикаторы . . . . .	50
§ 3. Приборные панели . . . . .	52
§ 4. Знаковая индикация . . . . .	53
§ 5. Экраны электронно-лучевых трубок . . . . .	55
§ 6. Графическая индикация. Цветовое кодирование . . . . .	56
§ 7. Восприятие речевых сообщений . . . . .	58
§ 8. Рекомендации по выбору индикаторов в SKU . . . . .	60
§ 9. Моторные компоненты действия оператора . . . . .	61

<i>Глава V. Оценка эффективности системы подготовки операторов .</i>	65
§ 1. Исследование некоторых критериев эффективности систем обучения и средств обучения операторов . . . . .	65
§ 2. Эффективность выполнения задачи в зависимости от степени обучения операторов . . . . .	73
§ 3. Получение априорных оценок и прогнозирование обучения . . . . .	78
§ 4. Синтез средств обучения с учетом психофизиологических характеристик человека . . . . .	84
<i>Литература . . . . .</i>	93

---