

Министерство высшего и среднего специального
образования Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П.Королева

Н.Е.Конюхов, В.А.Глазунов

Т Е Х Н И К О - Э К О Н О М И Ч Е С К А Я
О Ц Е Н К А Э Ф Ф Е К Т И В Н О С Т И
Р А Д И О Т Е Х Н И Ч Е С К И Х С И С Т Е М
П Е Р Е Д А Ч И И Н Ф О Р М А Ц И И

Учебное пособие

Куйбышев 1980

В учебном пособии рассмотрен системный подход к проектированию радиотехнических систем передачи информации (РСПИ). Основное внимание обращено на оптимизацию технико-экономических характеристик цифровых РСПИ, однако изложенные общие принципы оптимального проектирования могут быть использованы при построении и технико-экономической оценке радиотехнических систем различного назначения.

Пособие предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по специальности "Радиотехника", при изучении курсов "Радиотехнические системы передачи информации" и "Основы кибернетики (методы оптимизации)", а также может быть использовано при курсовом и дипломном проектировании.

Темплан 1980 г., поз. 1499.

Рецензент: Г.А. Ващурин

Утверждено на редакционно-издательском совете института 17.11.78 г.

© Куйбышевский авиационный институт, 1980 г.

В В Е Д Е Н И Е

Интенсивное развитие радиоэлектроники характеризуется широким внедрением микроэлектронных функционально законченных устройств, поэтому на первый план при подготовке радиомехаников выдвигаются задачи системотехники. Наличие готовых решений для отдельных узлов или даже блоков радиотехнических систем перемещает центр тяжести проектирования в область системных разработок, требующих технико-экономических оценок оптимальности решений. При этом технико-экономические расчеты и обоснования должны проводиться не как поверочные (т.е. путем сравнения спроектированной РСПИ с некоторой "базовой" системой), а органически входить в целевую функцию при проектировании.

I. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ

I.1. Математическая модель задачи и основные проблемы оптимального проектирования [1], [2]

Проблема оптимизации систем является одной из центральных в науке и технике, ибо какую бы задачу ни решал исследователь, он всегда пытается получить оптимальное решение. Проблема оптимизации включает в себя постановку оптимизационной задачи и методы ее решения. Наиболее важной и существенной является постановка задачи, ибо допущенные на этом этапе ошибки имеют принципиальный характер и не могут быть исправлены никакими изощренными математическими методами решения.

При постановке задачи проектирования радиотехнической системы как задачи оптимизации необходимо, во-первых, описать систему путем задания множеств параметров и ограничений на них, во-вторых, сформулировать критериальную функцию (критерий, представленный как функция оптимизируемых параметров системы, называется целевой функцией), в-третьих, произвести математическую запись задачи, используя уравнения связи между параметрами системы.

Любая радиотехническая система характеризуется множеством внешних $\vec{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ и внутренних $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ параметров. Внешние параметры описывают систему с точки зрения заказчика или потребителя (достоверность передачи информации в РСПИ, точность измерения координат в РЛС, стоимостные затраты и т.д.). Внешние параметры образуют целевую функцию системы $W(\vec{y}) = W(y_1, \dots, y_m)$. Система.

считается оптимальной в смысле выбранного критерия, если она доставляет экстремум целевой функции.

Внутренние параметры описывают систему с точки зрения проектировщика (мощность излучения, длительность импульса и т.д.), т.е. вариацией внутренних параметров разработчик добивается заданных внешних характеристик системы. В зависимости от цели создания системы один и тот же параметр может быть внешним, либо внутренним.

На внешние и внутренние параметры (все или часть) накладываются ограничения, которые определяют области их изменения:

$$\Phi_1(\vec{y}) \leq 0, \quad \Phi_2(\vec{x}) \leq 0.$$

Совокупность всех ограничений на внутренние и внешние параметры определяет множество допустимых систем, одна из которых, доставляющая экстремум целевой функции, является оптимальной. Математически задача отыскания (синтеза) оптимальной системы может быть представлена как задача отыскания

$$\begin{aligned} & \text{мин (макс)} W(y_1 \dots y_m) \\ & \text{при} \begin{cases} \Phi_1(\vec{y}) \leq 0 \\ \Phi_2(\vec{x}) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (I)$$

Внешние и внутренние параметры системы связаны уравнениями связи $F(\vec{x}, \vec{y})$:

$$\begin{cases} y_1 = f_1(\vec{x}) = f_1(x_1 \dots x_n), \\ y_m = f_m(\vec{x}) = f_m(x_1 \dots x_n). \end{cases} \quad (2)$$

Уравнения (2) отображают технико-экономическое построение системы, ее принципы функционирования, взаимное влияние характеристик системы и т.д. С учетом выражений (2) задача (I) переписывается как задача отыскания

$$\begin{aligned} & \text{мин (макс)} W(x_1 \dots x_n) \\ & \text{при} \Phi(x_1 \dots x_n) \leq 0, \end{aligned} \quad (3)$$

т.е. при синтезе системы необходимо найти вектор \vec{x}_0 , удовлетворяющий совокупности ограничений Φ и доставляющий экстремум показателя W .

Для формулировки оптимизационной задачи необходимо по определенным принципам получить целевую функцию системы, найти урав-

нения связи по результатам технико-экономического анализа проектируемой системы и после соответствующих преобразований произвести математическую запись задачи в виде системы (3).

Решение полученной в общем случае нелинейной задачи (3) является сугубо математической проблемой. Для нахождения оптимального вектора \bar{x}_0 можно использовать известные методы математического программирования с привлечением специалистов соответствующего профиля.

1.2. Принципы формирования целевой функции [3], [4], [5]

Трудности в формировании целевой функции объясняются противоречивыми требованиями, предъявляемыми к ней. Укажем четыре основных принципа формирования критерия эффективности:

1) критерий должен отражать назначение проектируемой системы, т.е. отражать степень соответствия системы своему назначению;

2) критерий должен учитывать все существенные параметры и быть критичным к ним;

3) критерий должен отвечать принципу единственности, т.е. обеспечивать минимум затрат (ресурсов) для достижения заданной эффективности, либо максимум эффективности при заданных затратах;

4) критерий должен допускать возможность определения его численного значения, быть достаточно простым и иметь физический смысл.

Таким образом, большое число учитываемых критерием параметров позволит полнее провести оптимизацию системы и отразить ее назначение, но при этом часто возникают непреодолимые трудности расчетного порядка, ибо функция $W(\bar{y})$ представляет собой векторную функцию множества разноразмерных величин [противоречие принципа 4) принципам 1), 2)].

Для сведения задачи векторного синтеза к скалярному разработано несколько форм целевой функции.

Первая форма. Целевая функция представляется в виде одного внешнего параметра. При этом все остальные $(m-1)$ внешние параметры переводятся в ограничения типа равенств или неравенств. Несмотря на простоту и ясный физический смысл, первая форма ограничена в использовании из-за значительной доли произвола при выборе одного главного параметра.

Вторая форма. Целевая функция представляется упорядоченной совокупностью целевых функций первой формы с приоритетами. Подобная ранжировка, т.е. расположение элементов в порядке значимости, позволяет использовать простой метод решения оптимизационной задачи, однако далеко не всегда можно проранжировать внешние параметры.

Третья форма. Целевая функция представляется как сумма параметров или их функций одной размерности. Наиболее приемлема указанная форма при оптимизации по экономическим параметрам, однако для получения целевой функции в явном виде необходимо перевести технические параметры в экономические.

В качестве целевой функции можно принять:

полные C или приведенные Z затраты (ΔC , ΔZ - потери);

экономический эффект \mathcal{E} ;
прибыль (эффективность) $\Pi = \mathcal{E} - C$.

В силу аддитивности экономических параметров задача оптимального проектирования системы может быть сведена к нахождению экстремума скалярной функции многих переменных:

$$\min_{\bar{x}} C = \min_{\bar{x}} \sum_i [C_i(\bar{x}) + \Delta C_i(\bar{x})];$$

$$\min_{\bar{x}} Z = \min_{\bar{x}} \sum_i [Z_i(\bar{x}) + \Delta Z_i(\bar{x})];$$

$$\max_{\bar{x}} \mathcal{E} = \max_{\bar{x}} \sum_i \mathcal{E}_i(\bar{x});$$

$$\max_{\bar{x}} \Pi = \max_{\bar{x}} \left\{ \sum_i \mathcal{E}_i(\bar{x}) - \sum_i [C_i(\bar{x}) + \Delta C_i(\bar{x})] \right\}.$$

Четвертая форма. Целевая функция представляется некоторой результирующей (чаще всего весовой) зависимостью от всех внешних параметров различной размерности. При этом для назначения весовых коэффициентов используется метод экспертных оценок, объективность которого может быть обеспечена проведением специальных психологических и социальных исследований.

Пятая форма - комбинированная, при которой для m' параметров вводится результирующая зависимость по формам № 3 или № 4, а на остальные $m - m'$ параметры накладываются ограничения, как при представлении целевой функции в форме № 1.

Наиболее плодотворной и перспективной следует считать третью форму целевой функции, однако для ее реализации необходимо отыс-

кивать взаимосвязь между экономическими (внешними) параметрами системы и набором ее технических характеристик, а также соотношения между техническими (внутренними) параметрами системы.

Такая взаимосвязь может быть получена с помощью уравнений связи.

1.3. Методы нахождения уравнений связи

Для нахождения уравнений связи используются аналитические методы, моделирование системы или ее частей на вычислительных машинах и методы аппроксимации экспериментальных данных.

Аналитические зависимости используются для установления взаимосвязи между следующими группами технических характеристик РСПИ:

I группа - характеристики передаваемых сообщений, например:

- $F_{\text{макс}}$ - максимальная частота спектра;
- $U_{\text{макс}}$ - максимальная амплитуда передаваемого сигнала;
- $\sigma_{\text{и}}$ - точность измерительного прибора;
- S - число передаваемых сообщений;

II группа - вид модуляции (способ передачи - $AM_{\text{н}}$, $ЧМ_{\text{н}}$, $ОДМ_{\text{н}}$, $ОФМ_{\text{н}}$);

III группа - вид и параметры помех, действующих в линии связи.

Для флуктуационных помех могут быть заданы:

N_0 - спектральная удельная плотность помехи, пересчитанная ко входу приемника РСПИ;

T_3 - эквивалентная шумовая температура входа (для бортовых приемников $T_3 = 500-1000^{\circ}\text{K}$, для наземных - $T_3 = 25-50^{\circ}\text{K}$);

IV группа - параметры передающей и приемной антенн; для наземных станций с параболической антенной $L_3 = 10-15$ м, для бортовых - $L_3 = 0,5-1,5$ м;

V группа - параметры прямо-передающего тракта:

λ - длина волны (для космических РСПИ $f = (2-2,3) \cdot 10^8$ МГц);

R - расстояние передачи;

$P_{изл}$ - мощность излучения. Для наземных станций
 $P_{изл}$ - до 10^5 Вт, для бортовых - до 50 Вт

VI группа - достоверность передачи информации $P_{ощ}$. В современных РСПИ требуемая величина достоверности лежит в пределах $P_{ощ} = 10^{-4} - 10^{-7}$.

Любой из параметров групп I-VI может быть найден по заданным остальным характеристикам. Для наглядности схему расчета РСПИ удобно представить в виде графа, т.е. в виде некоторой логической схемы, отражающей порядок системного расчета технических характеристик РСПИ.

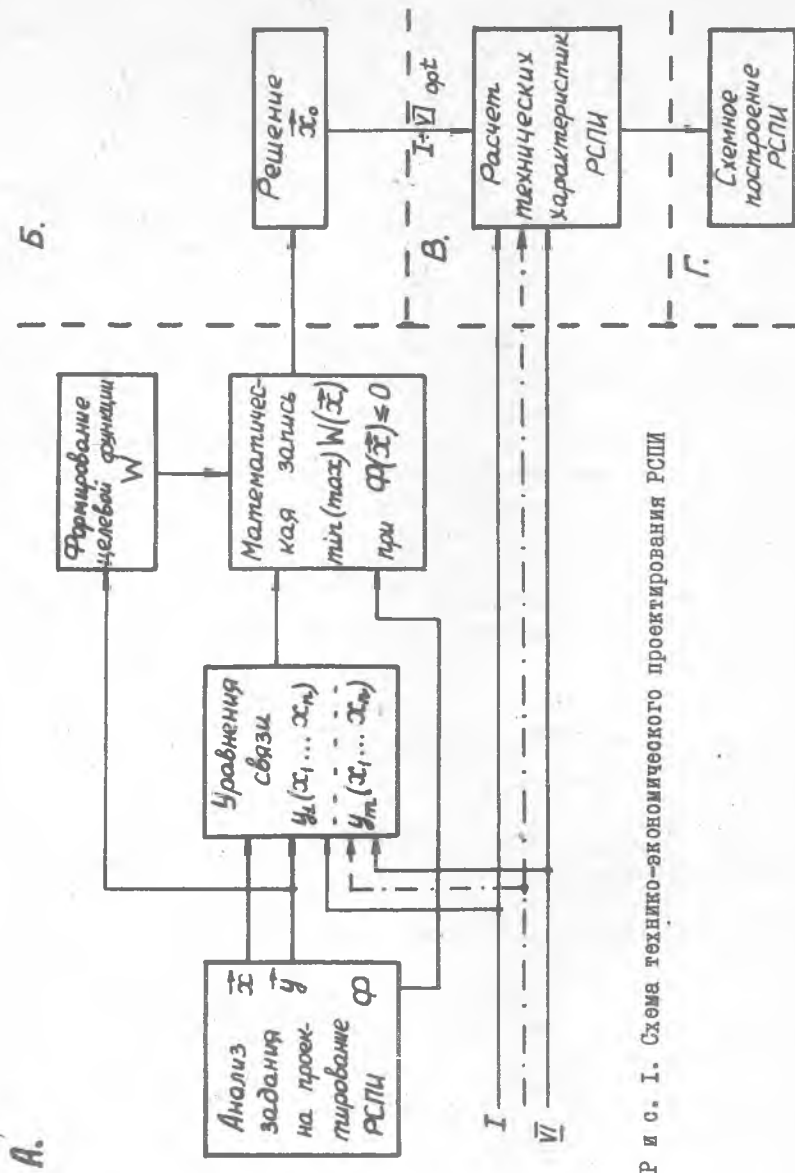
Для установления зависимости между техническими и экономическими параметрами используются, как правило, методы аппроксимации экспериментальных данных, по которым определяется функциональная зависимость между двумя в общем случае случайными величинами. В качестве критерия для установления такой зависимости наиболее распространен критерий минимума суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от проводимой кривой (метод наименьших квадратов).

Найденные уравнения связи позволяют по выбранному критерию оптимизации составить схему технико-экономического проектирования системы.

1.4. Схема технико-экономического проектирования системы

В общем случае схема проектирования включает в себя: А) математическую формулировку технико-экономической задачи оптимального проектирования; Б) ее решение; В) расчет (или уточнение) технических характеристик системы по найденным оптимальным показателям; Г) схемное построение РСПИ (рис. 1).

Для того, чтобы сформулировать математически задачу (А), необходимо на основе тщательного анализа задания на проектирование РСПИ 1) выделить внешние параметры \bar{y} и ограничения Φ_y на них, 2) выделить внутренние параметры \bar{x} и ограничения Φ_x на них, 3) сформировать целевую функцию как функцию внешних параметров по формам №№ 1-5 с использованием технико-экономических зависимостей. Далее на основе анализа вида целевой функции необходимо 4) опре-



Р и с. 1. Схема технико-экономического проектирования РСПИ

делить перечень требуемых в задаче уравнений связи и одним из указанных в § 1,3 методов найти их. По найденным уравнениям 5) произвести, если необходимо, преобразование целевой функции W и ограничений Φ_i через внутренние параметры и 6) записать оптимизационную задачу математически.

В результате решения (Б) сформулированной оптимизационной задачи находятся оптимальные значения одного или нескольких параметров групп I-VI/*opt*, а затем производится расчет остальных технических характеристик РСПИ (В - рис. 1). Проектирование системы заканчивается схемной реализацией найденных (оптимальных) показателей РСПИ (Г).

Наибольший интерес в указанной схеме для специалиста - радиоинженера представляют уравнения связи, отображающие, как отмечалось ранее, внутреннее построение РСПИ, поэтому в последующих двух разделах более подробно раскрыты аналитические зависимости и метод наименьших квадратов, позволяющие связать разнообразные характеристики РСПИ.

2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА РСПИ

Основные параметры приемно-передающего тракта РСПИ связаны следующими аналитическими соотношениями [6], [7]:
мощность сигнала на входе приемника

$$P_{свх} = P_{изл} \frac{G S_2}{4\pi R^2} \exp(-0,23\alpha R). \quad (4)$$

Здесь $P_{изл}$ - средняя мощность излучения;

G - кнд антенны передатчика; $G = \eta_A \left(\frac{\pi A_{np} \rho}{\lambda} \right)^2$;

S_2 - эффективная площадь приемной антенны; $S_2 = \eta_A \frac{\pi A_{pp}^2}{4}$;

R - расстояние между передающей и приемной антеннами;

A_{np}, A_{pp} - диаметры приемной и передающей антенн;

α - коэффициент затухания;

η_A - коэффициент эффективности использования апертуры антенны.

При расчетах можно принять:

$$\eta_A = 0,55;$$

$$\alpha = 0 \text{ для } \lambda > 10 \text{ см};$$

$$\alpha = 0,02 \div 0,2 \text{ 1/км для } \lambda \approx 5 \text{ см};$$

$$\alpha = 0,01 \div 1,0 \text{ 1/км для } \lambda \approx 3 \text{ см}.$$

Мощность шума на входе приемника

$$P_{ш \text{ вх}} = N_0 \Delta F_K = k T_0 \Delta F_K, \quad (5)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана;

ΔF_K - полоса пропускания приемного тракта РСПИ.

Из выражений (4) и (5) можно найти отношение сигнала к шуму по мощности $(P_c/P_{ш})_{\text{вх}}$, а с учетом запаса $\gamma = 2-10$ на трудноучитываемые факторы, снижающие помехоустойчивость (неидеальность синхронизации, межсимвольные помехи, особенности распространения радиоволн и др.):

$$(P_c/P_{ш})_{\text{вх}} \geq (P_c/P_{ш})_{\text{вх, тр}} \gamma. \quad (6)$$

Отношение сигнала к шуму определяется энергией посылки сигнала на входе приемника $E = P_{с \text{ вх}} \tau_0$ и спектральной плотностью шума N_0 :

$$\gamma^2 = \frac{E}{N_0} = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{\text{вх}} \Delta F_K \tau_0 = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{\text{вх}} B, \quad (7)$$

где $B = \Delta F_K \tau_0$ - база сигнала. Для простых сигналов $B \approx 1$.

Помехоустойчивость РСПИ определяется в первую очередь видом используемой в системе модуляции. В РСПИ передаются кодовые комбинации, состоящие из единичных элементов с амплитудной АМ_н, частотной ЧМ_н и относительной фазовой манипуляцией ОФМ-1 (прием методом сравнения фаз) и ОФМ-2 (прием методом сравнения полярностей). Для каждого вида модуляции могут быть получены формулы для расчета помехоустойчивости РСПИ, характеризующейся вероятностью ошибки $P_{ош}$ при воздействии на систему определенного вида помех:

$P_{ош, пот}$ - потенциальная помехоустойчивость;

- $P_{ош\ ког}$ - помехоустойчивость при когерентном приеме;
 $P_{ош}$ - помехоустойчивость при некогерентном приеме.

При передаче непрерывного сообщения $u(t)$ спектром $S(f)$ его предварительно квантуют по времени и по уровню, а затем полученный сигнал первичного кода $C(t)$ модулирует вторично высокочастотный сигнал: $A(t)$.

В таблице показаны эиоры сигналов при различных видах вторичной модуляции (способах передачи), приведены значения требуемой полосы пропускания РСПИ ΔF_A для каждого случая и рабочие формулы для расчета вероятности ошибки $P_{ош}$ при действиях на систему флуктуационных помех при некогерентном, когерентном приеме и потенциально-возможное значение помехоустойчивости.

При выборе модуляции необходимо обеспечить $P_{ош} \ll P_{ош\ доп}$, где $P_{ош\ доп}$ - допустимое (требуемое) значение вероятности ошибки, определяющее верность передачи информации.

Характеристики передаваемых сообщений связаны с параметрами РСПИ следующими зависимостями.

Шаг квантования по времени Δt определяется по теореме Котельникова:

$$\Delta t \ll \frac{1}{2F_{S\ макс}}; \quad \Delta t = \frac{1}{(2,3 \div 2,5)F_{S\ макс}}. \quad (15)$$

Число импульсов в одном сообщении $n_1 = \frac{\Delta t}{T}$, а при одновременной передаче S сообщений с учетом передачи кадровых (канальных) синхрои́мпульсов

$$n = \sum_{i=1}^S n_i + n_c = (S+1)n_1, \quad (16)$$

если $n_1 = n_2 = \dots = n_i = \dots = n_S = n_c$.

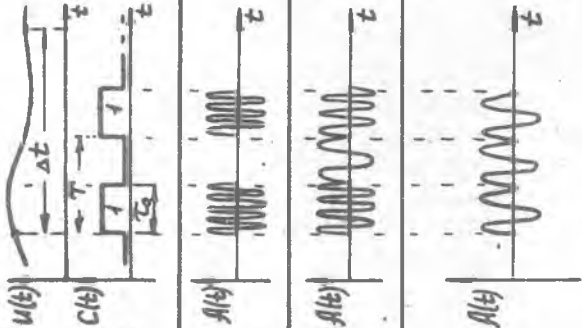


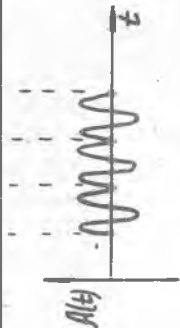
Шаг квантования по уровню ΔU выбирается, исходя из допустимого снижения ошибки измерения q по сравнению с точностью измерительного прибора σ_u :

$$\Delta U \ll 2\sqrt{3} \sigma_u \sqrt{q^2 - 1}. \quad (17)$$

При расчете допустимое снижение точности за счет дискретизации выбирается порядка 10%, поэтому $q = 1,1$.

Тогда число разрядов, необходимое для передачи в двоичном

Таблица

Вид модуляции	$U(t)$ 	Δf	$P_{\text{ош}}$	$P_{\text{ош, пот}} \equiv P_{\text{ош, пот}}$	Примечание
АМ _н		$\frac{1.1+1.2}{T_0}$ (8)	$0.5 e^{-\rho^2/4}$ (9)	$0.5 [1 - \varphi(\frac{\rho}{\sqrt{2}})]$ (9')	$\varphi(x) = 2 \int_0^x \frac{e^{-t^2/2}}{\sqrt{\pi}} dt$ - функция Гаусса
ЧМ _н		$\frac{2.2+2.4}{T_0}$ (10)	$0.5 e^{-\rho^2/2}$ (11)	$0.5 [1 - \varphi(\rho)]$ (11')	Значения функции Гаусса приведены в [7]
ФМ _н		$\frac{1.1+1.2}{T_0}$ (12)	$0.5 e^{-\rho^2}$ (13)	$0.5 [1 - \varphi(\sqrt{2}\rho)]$ (13')	для ФФМ-1
		— " —	$0.5 [1 - \varphi^2(\sqrt{2}\rho)]$ (14)	— " —	для ФФМ-2

коде всех возможных значений функции $U(t)$, определяется выражением

$$n_1 \geq \log_2 \left(\frac{U_{\max}}{\Delta U} + 1 \right). \quad (18)$$

В качестве первичного кода в таблице указаны униполярные двоичные символы с пассивной паузой ($\tau_0 = \frac{T}{2}$), однако в РСПИ могут быть применены различные виды первичных кодов (двоичный натуральный ДНК полярный, с активной и пассивной паузой, относительные двоичные коды S и M ($\tau_0 = T$), код Грея, рекуррентные циклические, двоично-десятичные и др.) [8].

За единицу количества информации в РСПИ принимается один бит (дв. единица). Далее термин "бит" используется для обозначения одного из двух символов x_1 или x_2 , применяемых в двоичной системе счисления (например, "0" или "1").

Скорость передачи информации B измеряется в бодах (бит/с):

$$B = \frac{1}{T} = \frac{n}{\Delta t} = 2n f_{S_{\max}} = 2 \log_2 \left(\frac{U_{\max}}{2\sqrt{3} \sigma_u \sqrt{q^2 - 1}} + 1 \right) f_{S_{\max}}. \quad (19)$$

Пропускная способность РСПИ (ρ) характеризует максимальное количество передаваемой информации в единицу времени. Пропускная способность определяется характеристиками канала передачи информации и интенсивностью помех.

Для двоичного симметричного канала (при равновероятном появлении символов x_1 и x_2)

$$\rho = B \left[1 + P_{\text{ош}} \log P_{\text{ош}} + (1 - P_{\text{ош}}) \log (1 - P_{\text{ош}}) \right]. \quad (20)$$

Здесь $P_{\text{ош}}$ - вероятность искажения символов кода.

При малой вероятности ошибочного приема $\rho \approx B$. С учетом передачи синхросигналов и защитных интервалов

$$\rho = \gamma_B B, \quad \text{где } \gamma_B = 0,6 \div 0,9. \quad (21)$$

Полоса пропускания РСПИ ΔF_K определяется спектром передаваемого сигнала ΔF_A :

$$\Delta F_K \geq \Delta F_A. \quad (22)$$

Например, для сигнала AM_H можно принять $\Delta F_A = \frac{1}{\tau_0}$, тогда $\Delta F_K = \frac{1}{\tau_0} = 2B$. В зависимости от вида используемой модуляции ско-

рость передачи информации связана с полосой сигнала $A(t)$ выражением $B = \gamma_n \Delta F_n$, где γ_n - коэффициент использования полосы пропускания РСПИ.

Параметры РСПИ, связанные соотношениями (4-22), удобно представить в виде схемы взаимосвязи.

2.1. Схема взаимосвязи между различными характеристиками системы

Схема взаимосвязи определяется заданными характеристиками РСПИ и требуемой целью расчета.

В качестве примера на рис. 2 приведена схема взаимосвязи, отражающая порядок расчета помехоустойчивости проектируемой РСПИ (параметр У1 группы) по известным остальным характеристикам I-U групп. Цифрами на линиях связи указаны номера формул, которыми необходимо пользоваться при расчетах.

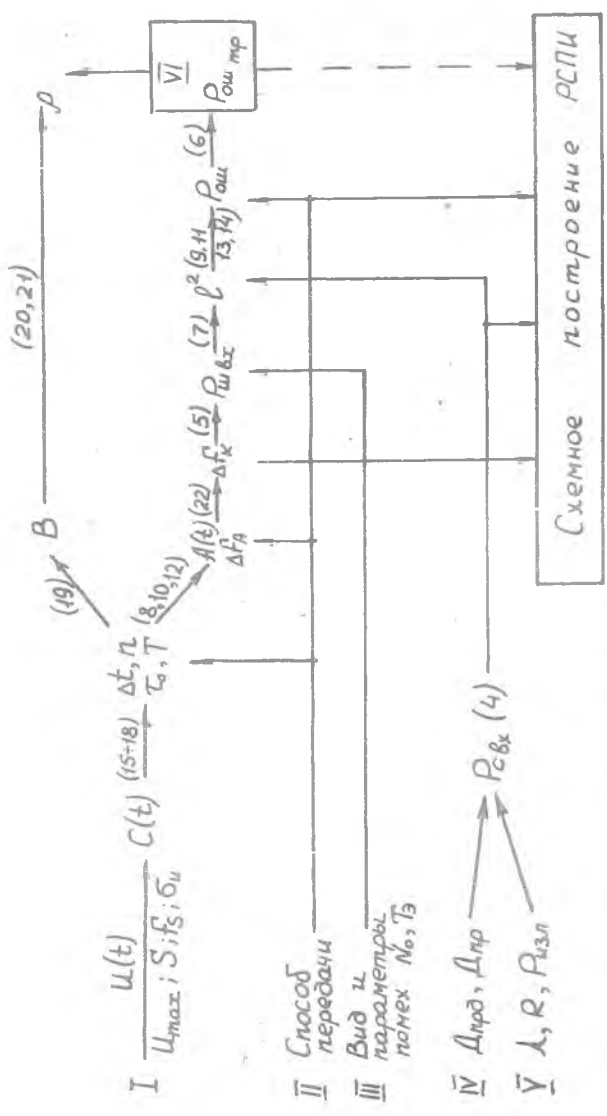
Первоначально по заданным параметрам I группы сигнала $U(t)$ находятся параметры первичного кодированного сигнала $C(t)$ по формулам (I5-I8):

- шаг квантования по времени Δt ;
- число передаваемых разрядов n_1, n ;
- параметры импульсного сигнала τ_0, T ;
- скорость передачи информации B по формуле (I9).

Далее для заданного способа передачи (группа II) определяется полоса сигнала ΔF_n (по формулам таблицы) и требуемая полоса частот канала передачи ΔF_k по выражению (22).

Параметры III группы используются для расчета мощности шумов на входе приемного тракта РСПИ $P_{швх}$ [для флуктуационных помех - по формуле (5)], параметры IV и V групп - для расчета мощности сигнала на входе приемника $P_{свх}$ по формуле (4), а затем по формуле (7) - отношение сигнала к шуму по мощности ℓ^2 .

По найденному отношению сигнала к помехе для заданного способа передачи рассчитывается достоверность передачи $P_{0ш}$ по одной из формул таблицы, а с учетом системного запаса по формуле (6) - допустимая величина вероятности ошибки $P_{0ш.тп}$. В заключение расчета определяется пропускная способность РСПИ ρ по формулам (20-2I). Найденные характеристики системы определяют



Р и с. 2. Схема взаимосвязи между параметрами РСП при расчете достоверности передачи сообщений

схемное построение РСПИ. Проектированием схемы и заканчивается разработка цифровой РСПИ.

Аналогично может быть построена схема взаимосвязи для выбора способа передачи по заданной величине достоверности $P_{ош}$, для определения параметров приемно-передающей части системы при заданном способе передачи и т.п.

Рассмотренная схема взаимосвязи органически входит в рис. 1 как схема нахождения уравнений связи и расчета технических показателей РСПИ.

3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РСПИ

Для РСПИ можно найти следующие виды технико-экономических зависимостей:

1) затраты на передающую часть, связанные с мощностью излучения соотношениями (рис. 3,а):

$$C_{прд} (P_{изл}) = A_1 + A_2 P_{изл},$$

$$C_{прд} (P_{изл}) = A_1 e^{A_2 P_{изл}} \quad \text{при } P_{изл} \geq P_{изл0}; \quad (23)$$

2) затраты на приемную часть, связанные с чувствительностью приемника зависимостью (рис. 3,б):

$$C_{пр} (P_{пор}) = A_1 e^{-A_2 P_{пор}} \quad (24)$$

при $P_{пор} \geq P_{пор0} = P_{свх\ мин0}$

или с диаметром приемной антенны при фиксированной чувствительности зависимостями (рис. 3,в):

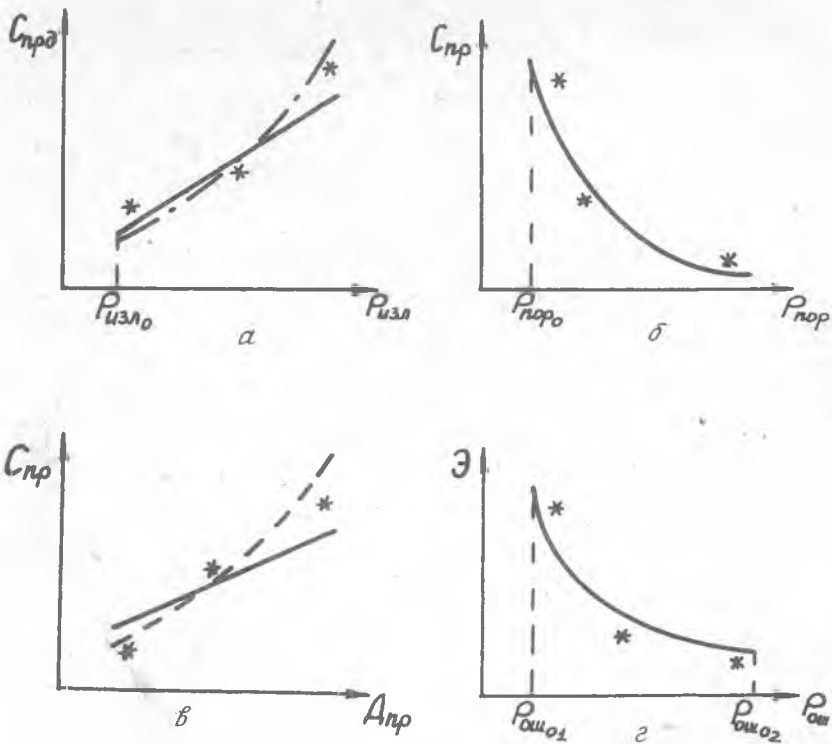
$$C_{пр} (D_{пр}) = A_1 e^{A_2 D_{пр}} \quad (25)$$

$$\text{или } C_{пр} (D_{пр}) = A_1 + A_2 D_{пр}^3; \quad (25)$$

3) экономический эффект от использования РСПИ определяется достоверностью передачи информации (рис. 3,г):

$$\mathcal{E} = A_1 (1 - P_{ош}) \quad (26)$$

при $P_{ош01} \leq P_{ош} \leq P_{ош02}$;



Р и с. 3. Техничко-экономические характеристики РСПИ

4) затраты (потери) при снижении надежности λ :

$$\Delta C_{\lambda} = A_1 \lambda^{A_2}$$

и др.

Помимо рассмотренных, могут быть найдены и другие технико-экономические зависимости, характеризующие построение РСПИ. Конкретный вид характеристик (23-26) может быть получен по экспериментальным данным (точкам * на рис. 3) методом наименьших квадратов.

3.1. Метод наименьших квадратов

для нахождения технико-экономических уравнений связи

Для установления функциональной зависимости между некоторым техническим "x" и экономическим "y" параметрами методом наименьших квадратов через "k" экспериментальных точек $x_1, y_1, \dots, x_k, y_k$ проводится кривая $y = f(x) = f(x, A_1, \dots, A_L)$ из условия $\sum_{i=1}^k [y_i - f(x_i, A_1, \dots, A_L)]^2 = \min$ [9].

"Экспериментальные" точки можно определить по известным разработкам, приведенным в справочниках, книгах, отчетах. Для этого выбираются элементы с известными техническими характеристиками (точки "x_i", $i = \overline{1, K}$), и для каждой разработки определяется экономическая характеристика, например, методом калькуляции [10] - точки "y_i", $i = \overline{1, K}$. При этом вид функциональной зависимости должен быть определен заранее.

Если $y = A_1 x + A_2$, то

$$A_1 = \frac{\kappa \sum_{i=1}^{\kappa} x_i y_i - \sum_{i=1}^{\kappa} y_i \sum_{i=1}^{\kappa} x_i}{\kappa \sum_{i=1}^{\kappa} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{\kappa} x_i \right)^2}, \quad (27)$$

$$A_2 = \frac{\sum_{i=1}^{\kappa} x_i^2 \sum_{i=1}^{\kappa} y_i - \sum_{i=1}^{\kappa} x_i \sum_{i=1}^{\kappa} x_i y_i}{\kappa \sum_{i=1}^{\kappa} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{\kappa} x_i \right)^2}.$$

При других видах функции $y = f(x)$ можно использовать вспомогательную замену переменных для приведения задачи к линейной форме. Так, если $y = Ax^{-a}$, то логарифмируя $\lg y = -a \lg x + \lg A$, вводятся переменные $x^* = \lg x$, $y^* = \lg y$, $A_1 = -a$, $A_2 = \lg A$, т.е. $y^* = A_1 x^* + A_2$. Рассчитав A_1 и A_2 по выражению (27), находим $a = -A_1$, $A = 10^{A_2}$.

4. ПРИМЕР СИСТЕМНОГО РАСЧЕТА РСПИ

З а д а н и е. Найти мощность передатчика $P_{изл}$ и пороговую мощность приемника $P_{свх\ мин}$ РСПИ, обеспечивающей предельную дальность действия $R_{макс} = 10$ км при минимальных затратах на прием-

ную и передающую части системы, если несущая частота передачи $f = 2 \cdot 10^8$ мГц, диаметр передающей антенны $D_{прд} = 16$ м, приемной - $D_{пр} = 1,5$ м. Затраты на передатчик изменяются по закону $C_{прд} = A_1 + A_2 P_{изл}$ при $P_{изл} \geq P_{изл0} = 50$ Вт, на приемную - по закону $C_{пр} = B_1 e^{-B_2 P_{свх мин}}$ при $P_{свх мин} \geq P_{свх мин0} = 5$ мВт и могут быть найдены по экспериментальным данным:

$P_{изл}, \text{Вт}$	200	300	500	$P_{свх мин}, \text{мВт}$	5	15
$C_{прд}, \text{руб}$	180	310	450	$C_{пр}, \text{руб}$	470	105

Определить способ передачи информации для обеспечения достоверности $P_{ощ} = 10^{-4}$ при спектральной плотности флуктуационных шумов $N_p = 1,6 \cdot 10^{-8}$ Вт/Гц при передаче двоичным кодом с расщепленной фазой $S = 10$ сообщений, максимальный спектр которых составляет 85 Гц, а требуемое число разрядов для передачи каждого сообщения равно 16, для передачи синхросигнала и времени - 5 и 6 соответственно. Найти основные характеристики РСПИ.

Решение. В результате анализа задания на разработку РСПИ выделим внешние параметры: затраты C , дальность связи R , с ограничением $R = R_{макс}$, и внутренние: мощность передатчика $P_{изл}$ и пороговая мощность приемника $P_{свх мин}$. В качестве целевой функции выбираем суммарные затраты на РСПИ: $C = C_{прд} + C_{пр} = C_{прд}(P_{изл}) + C_{пр}(P_{свх мин})$. Обозначим $P_{изл} = x_1$, $P_{свх мин} = x_2$, $C = y_1$, $R = y_2$. Тогда целевая функция запишется в виде $y_1 = f_1(x_1, x_2)$, а ограничение - в виде $y_2 = f_2(x_1, x_2) = R_{макс}$.

Отыскание уравнений связи

1. Связь между техническими параметрами РСПИ $y_2 = f_2(x_1, x_2)$, т.е. $R_{макс} = f(P_{изл}, P_{свх мин})$, находится аналитически по известному уравнению (4), в котором при $R = R_{макс}$ справедливо $P_{свх} = P_{свх мин}$:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{P_{изл}}{P_{свх мин}} = \frac{4\pi R_{макс}^2}{G_{прд} \cdot S_{пр}} = \frac{4\pi (10 \cdot 10^3)^2}{0,55^2 \left(\frac{\pi 16}{0,15}\right)^2 \frac{\pi 1,5^2}{4}} = 21 \cdot 10^3,$$

где $\lambda = \frac{c}{f} = 3 \cdot 10^8 / 2 \cdot 10^8 = 1,5 \text{ м}$.

2. Связь между техническими и экономическими параметрами $y_1 = f_1(x_1, x_2)$, т.е. $C = C_{прд}(P_{изл}) + C_{пр}(P_{свх мин})$ находится по задан-

ным таблицей экспериментальным данным. Для определения функции $C_{npd}(P_{взл})$ методом наименьших квадратов составим следующую таблицу ($x_i = P_{взл_i}$, $y_i = C_{npd_i}$):

K	x_i	y_i	x_i^2	$x_i y_i$
1	$200 \cdot 10^3$	180	$4 \cdot 10^{10}$	$36 \cdot 10^6$
2	$300 \cdot 10^3$	310	$9 \cdot 10^{10}$	$93 \cdot 10^6$
3	$500 \cdot 10^3$	450	$25 \cdot 10^{10}$	$225 \cdot 10^6$
Σ	$\Sigma x_i = 1000 \cdot 10^3$	$\Sigma y_i = 940$	$\Sigma x_i^2 = 38 \cdot 10^{10}$	$\Sigma x_i y_i = 354 \cdot 10^6$

Тогда для функции вида $y = A_1 + A_2 x$ по выражению (27)

$$A_1 = \frac{38 \cdot 10^{10} \cdot 940 - 1000 \cdot 10^3 \cdot 354 \cdot 10^6}{3 \cdot 38 \cdot 10^{10} - (1000 \cdot 10^3)^2} = 23,$$

$$A_2 = \frac{3 \cdot 354 \cdot 10^6 - 940 \cdot 1000 \cdot 10^3}{3 \cdot 38 \cdot 10^{10} - (1000 \cdot 10^3)^2} = 0,00087, \quad C_{npd} = 0,00087 P_{взл} + 23.$$

Для определения зависимости $C_{npd}(P_{свх мин})$ используем две известные точки, через которые проводим искомую кривую вида $y = A_1 e^{-A_2 x}$, т.е. из системы уравнений

$$\begin{cases} 470 = A_1 e^{-A_2 \cdot 5} \\ 105 = A_1 e^{-A_2 \cdot 15} \end{cases}$$

находим $A_1 = 1000$, $A_2 = 0,15$ и $C_{npd} = 1000 e^{-0,15 P_{свх мин}}$.

Таким образом, $y_1 = 23 + 0,00087 x_1 + 1000 e^{-0,15 x_2}$, и оптимизационная задача формулируется следующим образом: найти мин $y_1 = f_1(x_1, x_2)$ или мин $(23 + 0,00087 x_1 + 1000 e^{-0,15 x_2})$

при $\begin{cases} y_2 = f_2(x_1, x_2) = R_{\max} \\ x_1 \geq P_{взл_0}, x_2 \geq P_{свх мин_0} \end{cases}$ при $\begin{cases} \frac{x_1}{x_2} = 21 \cdot 10^3 \\ x_1 \geq 50 \cdot 10^3, x_2 \geq 5 \end{cases}$

Найдя из первого ограничения $x_1 = 21 \cdot 10^3 x_2$ и подставив его в целевую функцию, определим x_{2opt} из условия $\partial C / \partial x_2 = 0$:

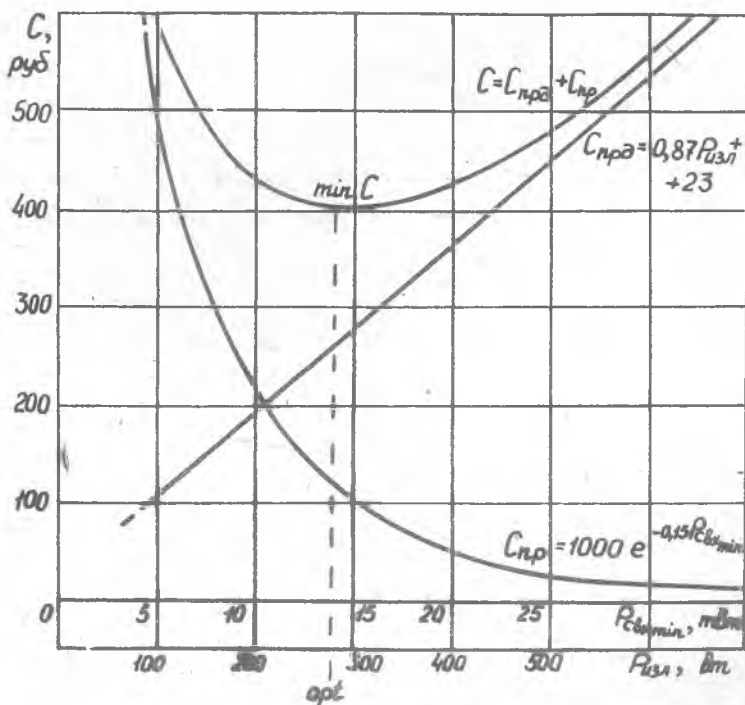
$$0,00087 \cdot 21 \cdot 10^3 - 0,15 \cdot 1000 e^{-0,15 x_2} = 0.$$

Отсюда находим $x_{2opt} = 14$, тогда $x_{1opt} = 21 \cdot 10^3 x_{2opt} = 294 \cdot 10^3$.

Таким образом, оптимальная пороговая мощность приемника РСПИ составляет $P_{свх мин opt} = 14$ мВт, оптимальная мощность передатчика равна $P_{изл opt} = 294$ Вт. При этом обеспечивается минимум суммарных затрат:

$$\text{мин } C = 278,8 + 122,5 = 401,3 \text{ руб.}$$

Графическая интерпретация решения оптимизационной задачи представлена на рис. 4.



Р и с. 4. Решение оптимизационной задачи проектирования РСПИ

Полученные оптимальные значения $P_{\text{вх опт}}$, $P_{\text{свх мин опт}}$ позволяют найти остальные параметры РСПИ в соответствии со схемой расчета, представленной на рис. 5:

1) число разрядов в кадровой посылке

$$n = Sn_1 + n_c + n_B = 10 \cdot 16 + 5 + 6 = 171,$$

где n_c, n_B - число разрядов для передачи синхросигнала и времени;

2) период опроса

$$\Delta t = \frac{1}{(2,2+2,4)F_{S \text{ макс}}} = \frac{1}{2,3 \cdot 85} = 0,005 \text{ с};$$

3) длительность импульса при использовании униполярных двоичных символов с пассивной паузой

$$\tau_0 = \frac{T}{2} = \frac{\Delta t}{2n} = \frac{0,005}{2 \cdot 171} = 0,0000145 \text{ с};$$

4) полоса пропускания канала ΔF_K определяется для всех возможных способов передачи (связь II \rightarrow ΔF_K на рис. 5), затем находится мощность шумов на входе $P_{\text{швх}}$, отношение сигнала к шуму

$\ell_{\text{opt}}^2 = \frac{P_{\text{свх опт}}}{P_{\text{швх}}}$ и достоверность передачи информации при принятом виде модуляции $P_{\text{ш}}(\Pi)$ с учетом системного запаса $\gamma^* = 2+10$ (реальная достоверность):

а) для АМ_н и ФМ_н:

$$\Delta F_K \geq \frac{1,2}{\tau} = \frac{1,2}{0,0000145} = 68,4 \text{ кГц}; \quad \Delta F_K = 68,5 \text{ кГц};$$

$$P_{\text{швх}} = N_0 \cdot \Delta F_K = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot 68,5 \cdot 10^3 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$\ell_{\text{opt}}^2 = \frac{P_{\text{свх опт}}}{P_{\text{швх}}} = \frac{14 \cdot 10^{-3}}{1,1 \cdot 10^{-3}} = 12,7;$$

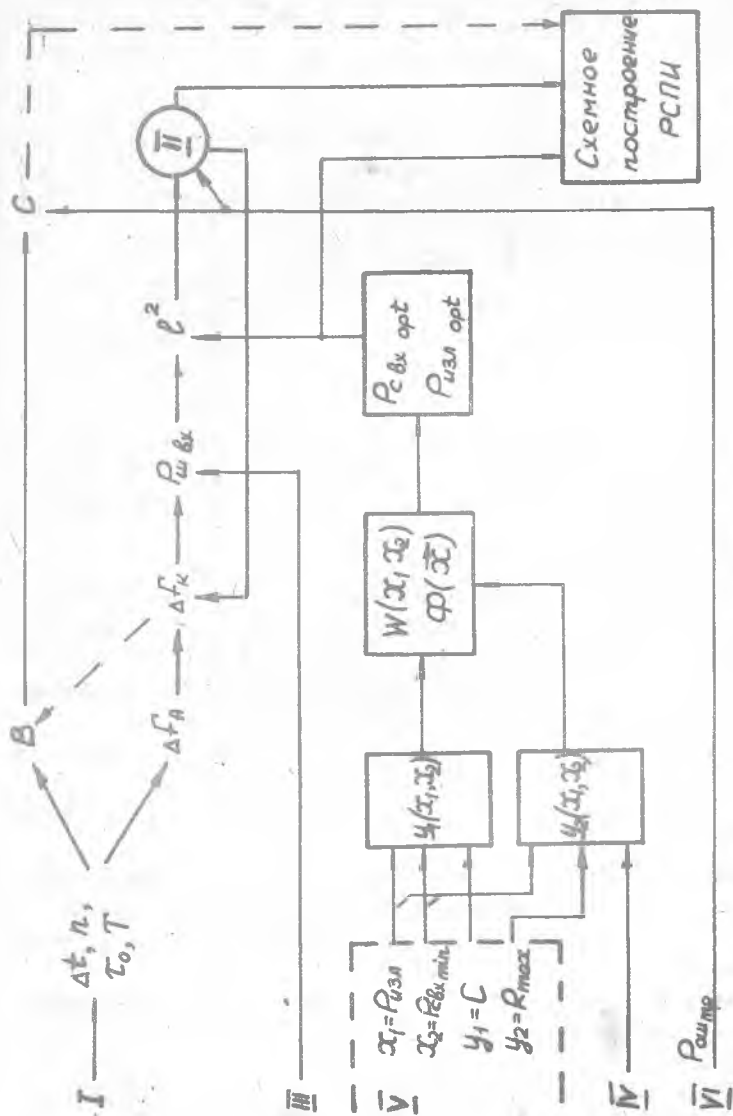
$$P_{\text{ш АМн}} = \frac{1}{\gamma} 0,5 e^{-\ell^2/4} = \frac{1}{2} 0,5 e^{-12,7/4} = 10^{-2};$$

$$P_{\text{ш ФМн-1}} = \frac{1}{\gamma} 0,5 e^{-\ell^2} = \frac{1}{2} 0,5 e^{-12,7} = 0,5 \cdot 10^{-6};$$

$$P_{\text{ш ФМн-2}} = \frac{1}{\gamma} [1 - \Phi^2(\sqrt{2}\ell)] = 10^{-6};$$

б) для ЧМ_н:

$$\Delta F_K \geq \frac{2,4}{\tau_0} = \frac{2,4}{0,0000145} = 157,6 \text{ кГц}; \quad \Delta F_K = 158 \text{ кГц};$$



Р и с. 5. Схема технико-экономического проектирования РСПИ (для примера)

$$P_{\omega \delta x} = N_0 F_K = 1,6 \cdot 10^{-6} \cdot 158 \cdot 10^3 = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт};$$

$$l_{opt}^2 = \frac{P_{\delta x_{opt}}}{P_{\omega \delta x}} = \frac{14 \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot 10^{-3}} = 6,4;$$

$$P_{\omega \phi_{МН}} = \frac{1}{\beta} 0,5 e^{-l^2/2} = \frac{1}{2} 0,5 e^{-6,4/2} = 0,3 \cdot 10^{-3}.$$

По сопоставлению найденных значений достоверности $P_{\omega \phi}$ для различных способов передачи с требуемой $P_{\omega \phi_{треб}} = 10^{-5}$ (связь У1-П → ΔF_K → У1 на рис. 5) делаем заключение об использовании в РСПИ фазовой манипуляции $ОФМ_{н-I}$;

5) скорость передачи информации

$$B = \frac{n}{\Delta t} = \frac{171}{0,0000145} = 11,8 \cdot 10^6 \text{ бод};$$

6) пропускная способность

$$\rho = B [1 + 10^{-5} \log 10^{-5} + (1 - 10^{-5}) \log (1 - 10^{-5})] = 10^7 \text{ бод}.$$

Заключительной частью проектирования является разработка схемы РСПИ. Первоначально в соответствии с заданием составляется структурная схема. Для рассмотренного примера такая схема представлена на рис. 6.

В общем случае в состав РСПИ входят [6], [7], [8]:

первичные преобразователи информации $ПП_1, \dots, ПП_{S=10}$, формирующие унифицированный электрический сигнал от источника сообщений;

суммирующее устройство " Σ ", включающее в себя электронный коммутатор для поочередного подключения информационных и вспомогательных (синхроимпульсы и время) импульсов;

кодирующее устройство КУ, преобразующее первичный сигнал $u(t)$ в цифровой $C(t)$ (аналого-цифровой преобразователь АЦП);

передающее устройство $ПрД$, в котором модулируются колебания несущей частоты;

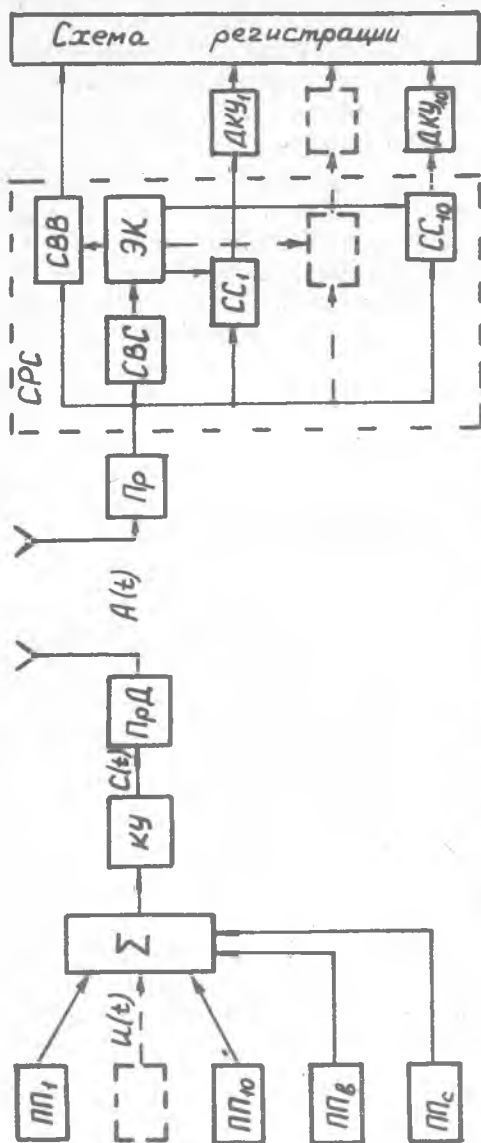
приемное устройство $Пр$ для приема и демодуляции сигнала;

схема разделения сообщений, осуществляющая преобразование сигнала, обратное сумматору (СРС); СС - схемы совпадения, ЭК - электронный коммутатор;

декодирующие устройства $ДКУ_x - ДКУ_{10}$, выделяющие передаваемый сигнал $u(t)$ (цифро-аналоговый преобразователь ЦАП);

схема регистрации.

По структурной схеме составляется функциональная схема приемной и (или) передающей частей системы и принципиальная схема како-



Р и с. 6. Структурная схема РОЛИ

ко-либо узла, указанного преподавателем. Разработанная схема должна быть выполнена на интегральных элементах.

При составлении принципиальной схемы необходимо использовать литературу по микроэлектронной цифровой схемотехнике [II]-[I4]. В качестве заданий на разработку может быть предложен один из элементов приемной или передающей частей РСПИ, например:

электронный коммутатор на заданное в работе число каналов [II - I3];

модуляторы или демодуляторы ОФМ [I3];

преобразователи ДНК в код Грея, двоично-десятичный код и т.д., а также обратные преобразователи [I3];

схемы формирования синхросигналов, устройства синхронизации и фазирования;

отдельные элементы РСПИ: счетчики, регистры, декодеры [II], [I2], АЦП и ЦАП [I4] и т.д.

5. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ

Работа состоит из пояснительной записки и графических материалов.

Объем пояснительной записки должен составлять 20-30 страниц текста на листах формата А4. Листы нумеруются и сшиваются в стандартной обложке, выдаваемой вместе с заданием.

В состав пояснительной записки входят:

- 1) титульный лист (обложка);
- 2) задание на проект;
- 3) обобщенная структурная схема РСПИ и краткое описание ее функционирования;
- 4) временные диаграммы и спектры сигналов, над которыми осуществляется преобразование в системе $[u(t), c(t), A(t)]$;
- 5) схема проектирования, включающая в себя и математическую формулировку оптимизационной задачи;
- 6) численный расчет характеристик РСПИ;
- 7) схема реализации системы;
- 8) заключение (выводы);

9) литература.

Схема, графики и рисунки выполняются на отдельных листах или на миллиметровке карандашом и вкладываются в пояснительную записку.

В состав графической части входит один лист формата 24, на котором отображаются:

- 1) схема проектирования;
- 2) результаты расчетов;
- 3) схемное построение элементов (частей) РСПИ и временные диаграммы, поясняющие работу системы.

Л и т е р а т у р а

1. О к у н е в Ю.Б., П л о т н и к о в В.Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. М., "Связь", 1976, с. 184.
2. П а ш к е е в С.Д., М и н я з о в Р.И., М о ж л е в - с к и й В.Д. Машинные методы оптимизации в технике связи. М., "Связь", 1976, с. 272.
3. Г у т к и н Л.С. Оптимизация радиоэлектронных устройств по совокупности показателей качества. М., "Советское радио", 1975, с. 368.
4. С е р в и н с к и й Е.Г. Оптимизация систем передачи дискретной информации. М., "Связь", 1974, с. 336.
5. З е л и г е р А.Н. Критерии оценки качества систем связи. М., "Связь", 1974, с. 40.
6. П е н и н П.И. Системы передачи цифровой информации. М., "Советское радио", 1976, с. 368.
7. Л о с е в Ю.И., П л о т н и к о в Н.Д. Основы теории передачи данных (сборник задач). К., "Вища школа", 1977, с. 160.
8. Справочник по телеметрии. М., "Машиностроение", 1971, с. 482.
9. Д е м и д о в и ч Б.П., М а р о н И.А. Основы вычислительной математики. М., "Наука", 1970, с. 664.
10. Л а в р о в Е.М., Г о л ь я н о в В.П. Технике-эконо-

- мическое обоснование дипломных проектов радиотехнических специальностей ВУЗов (О701), КуАИ, 1976, с. 60.
11. Проектирование радиоэлектронных устройств на интегральных микросхемах. Под ред. С.Я. Шаца. М., "Советское радио", 1976, с. 312.
 12. Б у к р е е в И.Н., М а н с у р о в Б.М., Г о р я ч е в В.М. Микроэлектронные схемы цифровых устройств. М., "Советское радио", 1975, с. 368.
 13. Ш л я п о б е р с к и й В.И. Основы техники передачи дискретных сообщений. М., "Связь", 1973, с. 480.
 14. Преобразование информации в аналого-цифровых вычислительных устройствах и системах. Под ред. Г.М. Петрова. М., "Машиностроение", 1973, с. 360.

О Г Л А В Л Е Н И Е

В в е д е н и е	3
1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНО- ГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ.....	4
1.1. Математическая модель задачи и основные проблемы оптимального проектирования...	4
1.2. Принципы формирования целевой функции..	6
1.3. Методы нахождения уравнений связи.....	8
1.4. Схема технико-экономического проектиро- вания системы.....	9
2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ УРАВНЕНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ПРИЕМНО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА РСПИ.....	11
2.1. Схема взаимосвязи между различными харак- теристиками системы.....	16
3. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РСПИ.....	18
3.1. Метод наименьших квадратов для нахождения технико-экономических уравнений связи....	20
4. ПРИМЕР СИСТЕМНОГО РАСЧЕТА РСПИ.....	21
5. ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ ПО РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ.....	28
Л и т е р а т у р а	29

Николай Евгеньевич К о н ю х о в,
Владислав Александрович Г л а з у н о в

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ .

Учебное пособие

Редактор Н.В. К а с а т к и н а
Техн. редактор Н.М. К а л е н ю к
Корректор Е.Д. А н т о н о в а

Подписано в печать 17.1.80 г. Е000147. Формат 60x84¹/16.
Бумага оберточная белая. Оперативная печать.
Усл.п.л. 1,86. Уч.-изд.л. 1,7. Тираж 500 экз.
Заказ № 768 Цена 12 коп.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени С.П. Королева.
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Областная типография имени В.П. Мяги.
г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.