

**МПС РОССИИ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ**

---

**19/2/10**

**Одобрено кафедрой  
«Автоматика и телемеханика на  
железнодорожном транспорте»**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
И СВЯЗИ**

**Методические указания к выполнению  
лабораторных работ № 1–4  
для студентов IV курса специальности**

**210700. АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)**



Боровков Ю.Г., Орлов А.В. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Теоретические основы автоматики и телемеханики». — М: РГОТУПС, 2003, 54 с.

В методических указаниях представлены 4 лабораторных работы по исследованию устройств автоматики и телемеханики с применением ПЭВМ.

Автор: доц. Ю.Р. Боровиков  
Рецензент: доктор техн. наук, проф.  
И.Е. Дмитренко

© Российский государственный открытый технический университет путей сообщения Министерства путей сообщения, 2003

Лабораторная работа № 1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВОГО АПЕРИОДИЧЕСКОГО ЗВЕНА САУ

*Цель работы:* изучение основных характеристик и параметров типовых звеньев систем автоматического управления САУ; исследование влияния постоянной времени апериодического звена на логарифмические ЛЧХ и амплитудно-фазовые частотные характеристики.

### Теоретическая часть

Уравнение апериодического (инерционного) звена в общем виде имеет вид:

$$a_0 \cdot \frac{dy}{dt} + a_1 \cdot y = b \cdot x,$$

где  $a_0, a_1, b$  — константы.

Стандартная форма записи имеет вид:

$$T \cdot \frac{dy}{dt} + y = k \cdot x,$$

где  $T = \frac{a_0}{a_1}$  — постоянная времени нарастания выходного сигнала;

$k = \frac{b}{a_1}$  — статический коэффициент усиления.

В операторной форме уравнение апериодического звена имеет вид:

$$y \cdot (T \cdot p + 1) = k \cdot x,$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  — знак дифференцирования по времени (оператор Лапласа).

Основные характеристики апериодического звена:

1. *Передающая функция* инерционного звена есть отношение выходного сигнала  $y$  к входному  $x$ :

$$W(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1}.$$

2. *Переходная функция* звена  $h(t)$  описывает реакцию звена на единичное ступенчатое воздействие:

$$h(t) = k \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

Запись переходной функции в операторной форме имеет вид:

$$H(p) = \frac{W(p)}{p}.$$

3. *Частотные характеристики* инерционного звена:

а) *амплитудно-фазовая частотная характеристика* звена может быть получена путем замены оператора Лапласа  $S$  в выражении передающей функции на  $j\omega$  ( $\omega$  — круговая частота).

$$W(j\omega) = \frac{k}{T \cdot j\omega + 1} = U(\omega) + j \cdot V(\omega);$$

$$\text{где } U(\omega) = \frac{k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1}, \quad V(\omega) = -\frac{k \cdot T \cdot \omega}{T^2 \cdot \omega^2 + 1}.$$

*АФЧХ* представляет собой вектор с началом в точке пересечения комплексных координатных осей. *Годограф АФЧХ* — это кривая на комплексной плоскости, которую описывает конец вектора *АФЧХ* при изменении круговой частоты от 0 до  $\infty$ ;

б) *амплитудно-частотная характеристика АЧХ* есть модуль вектора *АФЧХ*:

$$|W(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)} = \frac{k}{\sqrt{T^2 \cdot \omega^2 + 1}}.$$

Графическое представление *АЧХ* неудобно, поэтому на практике большее распространение имеет логарифмическая *АЧХ (ЛАЧХ)*;

в) *логарифмическая амплитудно-частотная характеристика ЛАЧХ* получается, если взамен непосредственных значений круговой частоты  $\omega$  использовать десятичные логарифмы этих значений (на графике *ЛАЧХ* ось абсцисс градуируется в логарифмических единицах):

$$L(\lg(\omega)) = 20 \cdot \lg|W(j\omega)| = 20 \cdot \lg k - 10 \cdot \lg(1 + T^2 \cdot \omega^2).$$

Приближенно *ЛАЧХ* можно заменить двумя асимптотами (асимптотической *ЛАЧХ*), к которым она стремится при  $\omega \rightarrow 0$  и  $\omega \rightarrow \infty$ . Частота на которой находится точка пересечения асимптот называется *сопрягающей частотой*. Она может быть определена из соотношения:

$$\omega_c = \frac{1}{T}.$$

Уравнения для построения асимптотической *ЛАЧХ*  $L(\lg(\omega))$  имеют вид:

$$L(\lg(\omega)) = \begin{cases} 20 \lg k, & \omega = 0 \dots \frac{1}{T} \\ 20(\lg k - \lg \omega T), & \text{при } \omega > \frac{1}{T}. \end{cases}$$

Из нижнего неравенства следует, что значение функции  $L$  в указанном диапазоне изменения круговой частоты  $\omega$  с увеличением последней уменьшается на 20 дБ через каждую декаду (декада — изменение параметра в десять раз);

г) *фазовая частотная характеристика ФЧХ* определяется как:

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{V(\omega)}{U(\omega)} = -\operatorname{arctg}(\omega \cdot T).$$

*Техническая реализация:*

Электродвигатель небольшой мощности, который после включения в сеть набирает обороты.

Некоторые виды RC и RL цепей.

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 1**

1. Ознакомиться с основными определениями и формулами из раздела «Теоретическая часть».

2. Запустить программу моделирования звеньев САУ. При этом появится пустой экран с мигающим курсором, в верхней части которого имеется строка подсказки по доступным функциональным клавишам с указанием присвоенных им текущих функций.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** в различных режимах работы программы изменяется как список доступных функциональных клавиш, так и присвоенные клавишам функции, поэтому при переключении режимов программы рекомендуется внимательно следить за строкой подсказки.

3. Перейти в режим набора схемы, для чего нажать на функциональную клавишу F2. В нижней части экрана активизируется окно с пиктограммами набора типовых блоков САУ.

4. Используя клавиши – стрелки, выделить блок генератора ступенчатой функции, пиктограмма которого имеет вид, представленный на рис. 1.

Генератор формирует ступенчатый (тестовый) сигнал  $y(t) = k$ , который должен поступать на вход инерционного звена.

5. Зафиксировать выбор нажатием клавиши «Enter». При этом появится окно параметров генератора.

6. В выделенной строке ввести значение уровня сигнала генератора «k», равное 1 (единичное ступенчатое воздействие). Ввод параметра завершить нажатием клавиши «Enter». При этом в рабочей области экрана появится блок генератора.

7. Используя клавиши – стрелки, выделить блок аperiodического звена. Его пиктограмма имеет вид, представленный на рис. 2. Подтвердить выбор нажатием клавиши «Enter».

8. Ввести параметры аperiodического звена:

- $k = x$  — статический коэффициент усиления звена, где вместо x записывается последняя цифра шифра студента (если последняя цифра ноль, то установить значение  $k = 10$ ).
- $T = 0,1$  — постоянная времени нарастания сигнала на выходе звена, сек;
- $Y_0 = 0,0$  — начальные условия (значение функции выхода  $y(t)$  при  $t = 0$ ).

Для перехода между строчками параметров использовать клавиши – стрелки. Ввод параметров завершить нажатием клавиши «Enter».

9. Выйти из режима набора схемы, для чего нажать клавишу «Esc». При этом на экране должна отобразиться схема из двух последовательно соединенных блоков, а наборная панель должна исчезнуть.

10. Запустить режим построения логарифмических частотных характеристик ЛЧХ, для чего нажать функциональную клавишу F9. В нижней части экрана при этом появятся два окна, а аperiodическое звено будет помечено символом «А». Левое окно служит для выбора звена схемы, для которого строятся ЛЧХ. Правое окно содержит логарифмические оси координат: оси ординат —  $20\lg|W|$  (дБ) и  $\varphi$  (град); ось абсцисс —  $\lg\omega$ , где  $\omega$  — круговая частота, рад/сек ( $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  — частота, Гц).

11. В левом окне ввести равенство  $L = A$  (исследование логарифмических характеристик звена «А») и нажать клавишу «Enter». В правом нижнем окне появятся два графика в одних осях:

график ЛАЧХ (логарифмическая амплитудно-частотная характеристика):  $20\lg|W| = f_1(\lg(\omega))$ ;

график ЛФЧХ (логарифмическая фазо-частотная характеристика):

$$\varphi = f_2(\lg(\omega)).$$

12. Нажать клавишу F3, чтобы увеличить графики.

13. Зарисовать графики ЛАЧХ и ЛФЧХ один под другим с общей осью абсцисс.

14. Построить асимптотическую ЛАЧХ по характерным точкам оси абсцисс:

$$\omega = \frac{0,01}{T}; \omega = \frac{0,1}{T}; \omega = \frac{1}{T}; \omega = \frac{10}{T}; \omega = \frac{100}{T}.$$

15. Определить значения модуля вектора  $|W(j\omega)|$  — АЧХ и частоты  $\omega$  при  $\varphi = -45^\circ$ .

16. Найти аналитическим путем значения модуля вектора  $W$  и частоты  $\omega$  при  $\varphi = -45^\circ$  (см. формулы из теор. части). Сравнить результаты расчета с графиками, полученными компьютером.

17. Определить и построить график ошибки в виде функции от  $\lg\omega$  при использовании асимптотической ЛАЧХ.

18. Найти на графике асимптотической ЛАЧХ значение частоты  $\omega$  при  $L(\lg\omega) = 0$ . Найти расчетным путем значение данной частоты.

19. Нажать клавишу F3, а затем F4. На экране появится годограф амплитудно-фазовой частотной характеристики АФЧХ.

20. Зарисовать АФЧХ и определить по графику значения действительной и модуля мнимой части вектора  $W(j\omega)$  в

точке экстремума кривой АФЧХ. Найти расчетное значение частоты  $\omega$ , при котором проекции вектора  $W(j\omega)$  на оси координат равны между собой.

21. Отключить режим построения логарифмических частотных характеристик для чего нажать клавишу F3, а затем дважды — «Esc».

22. Нажатием клавиши F7 запустить режим «Моделирование».

23. Нажать клавишу F2 для выбора метода моделирования. На экране появится список вычислительных методов численного интегрирования.

24. Используя клавиши – стрелки, выбрать функцию Эйлера и задать ее следующие параметры:

- шаг (погрешность) вычисления установить  $0.x$ , где  $x$  — первая значимая цифра (кроме нуля) шифра студента перед последней цифрой.

- Временной интервал расчета  $t_k = 1$  сек.

Подтвердить ввод данных нажатием клавиши «Enter».

25. Нажать клавишу F3 (счет), а затем клавишу F6 (график). На экране появятся звенья схемы. Используя клавиши – стрелки, выбрать инерционное звено. Подтвердить выбор нажатием клавиши «Enter». В результате на экран выведется график переходной функции звена в виде реакции звена на единичное ступенчатое воздействие  $x(t) = 1(t)$ :

$$h(t) = k \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

26. Зарисовать график и определить экспериментальным путем по графику значение постоянной времени  $T$  на уровне  $0,632 \cdot k$  и сравнить его с заданным значением. Определить длительность переходного процесса до уровня  $0,9 \cdot k$ .

### Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.

2. Основные формулы и определения.
3. Принципиальную схему модели.
4. Графические зависимости: ЛАЧХ, ЛФЧХ, АФЧХ, асимпт. ЛАЧХ, переходную характеристику исследуемого звена.
5. Расчетную часть.
6. Выводы.

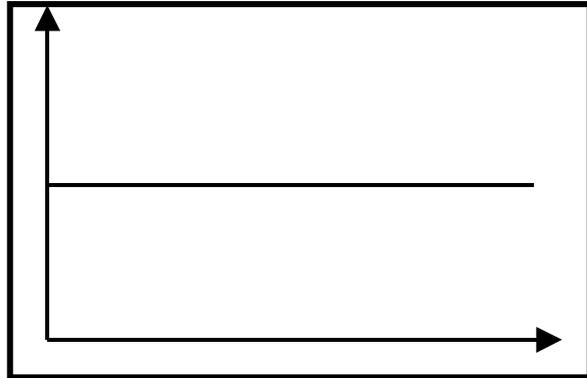


Рис. 1

$$\frac{K}{TS + 1}$$

Рис. 2

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНОЙ САУ

**Цель работы:** синтез САУ из типовых звеньев по заданной схеме и анализ ее устойчивости с использованием критериев Михайлова и Найквиста.

### Теоретическая часть

Устойчивость – это свойство системы возвращаться в исходное состояние после вывода ее из этого состояния и прекращения действия возмущения.

Задача определения условий устойчивости САУ одна из главных задач теории САУ, так как неустойчивые системы неработоспособны.

Дифференциальное уравнение линейной САУ, записанное для регулируемой выходной величины  $y(t)$  при наличии управляющего воздействия  $x(t)$ , имеет вид:

$$\begin{aligned} a_0 \cdot y^{(n)}(t) + a_1 \cdot y^{(n-1)}(t) + \dots + a_n \cdot y(t) = \\ = b_0 \cdot x^{(m)}(t) + b_1 \cdot x^{(m-1)} + \dots + b_m \cdot x(t), \end{aligned}$$

где  $a_0, a_1, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$  — постоянные коэффициенты.

Общее решение дифференциального уравнения имеет вид:

$$y(t) = y_e(t) + y_{ce}(t).$$

Слагаемое  $y_e(t)$  — вынужденная составляющая, имеющая тот же характер, что и правая часть уравнения, и являющаяся частным решением неоднородного дифференциального уравнения с правой частью. Слагаемое  $y_{ce}(t)$  — свободная составляющая, которая является общим решением однородного дифференциального уравнения без правой части:

$$a_0 \cdot y^{(n)}(t) + a_1 \cdot y^{(n-1)}(t) + \dots + a_n \cdot y(t) = 0.$$

В операторной форме однородное дифференциальное уравнение имеет вид:

$$a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (1)$$

Анализ САУ на устойчивость заключается в нахождении корней характеристического уравнения и проверке условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_{ce}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n C_k \cdot e^{p_k t} = 0.$$

На практике решение характеристического уравнения (особенно для САУ высоких порядков) представляет большие сложности, поэтому широкое распространение имеют частотные критерии оценки устойчивости САУ.

### **Критерий Найквиста**

Для того, чтобы САУ была устойчива необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутого контура  $W(j\omega)$  не охватывала в комплексной плоскости точку с координатами  $(-1; j0)$ .

### **Критерий Михайлова**

Для того, чтобы САУ порядка  $n$  была устойчива необходимо и достаточно чтобы годограф Михайлова, начинаясь на положительной действительной полуоси, проходил в положительном направлении (против часовой стрелки) последовательно  $n$  квадрантов, нигде не обращаясь в нуль, уходя в последнем квадранте в бесконечность.

Годограф Михайлова строится на основе характеристического уравнения замкнутой САУ (1), путем выделения действительной и мнимой части (если исходной для анализа на устойчивость является передаточная функция замкнутой системы, то характеристическое уравнение есть знаменатель передаточной функции).

### **Логарифмический критерий Найквиста**

Система неустойчива, если при сдвиге фазы  $\varphi = -180^\circ$  — логарифмическая амплитудно-частотная характеристика находится в положительной области  $20 \cdot \lg|W(j\omega)| > 0$

При синтезе САУ необходимо знать следующее:

• Передаточные функции типовых звеньев имеют вид:

$$1. \quad W(p) = \frac{k}{T \cdot p + 1} \quad \text{— для апериодического (инерционного) звена.}$$

$$2. \quad W(p) = \frac{k}{p} \quad \text{— для интегрирующего звена.}$$

$$3. \quad W(p) = \frac{k}{T_1^2 \cdot p + T_2 \cdot p + 1} \quad \text{— для колебательного звена}$$

(двух апериодических звеньев первого порядка).

$$4. \quad W(p) = k \quad \text{— для пропорционального звена.}$$

5.  $W(p) = k \cdot p$  — для идеального дифференцирующего звена.

$$6. \quad W(p) = \frac{k \cdot p}{T \cdot p + 1} \quad \text{— для реального дифференцирующего звена.}$$

го звена.

• При параллельном соединении  $n$  звеньев результирующая передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_n(p).$$

• При последовательном соединении  $n$  звеньев результирующая передаточная функция имеет вид:

$$W(p) = W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot \dots \cdot W_n(p).$$

• При замыкании цепи обратной связи, передаточная функция равна:

$$W_{замкн}(p) = \frac{W_{разомк}(p)}{1 + W_{разомк}(p) \cdot W_{обр.св}(p)},$$

где  $W_{разомк}(p)$  — п.ф. разомкнутой САУ;  $W_{обр.св}(p)$  — п.ф. звеньев, входящих в цепь ОС.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ  
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 2**

1. Ознакомиться с основными формулами и определениями из раздела «Теоретическая часть».

2. Запустить программу моделирования САУ.

3. По номеру компьютера выбрать вариант компоновки САУ и набор типовых звеньев (передаточные функции элементов схемы по номерам присвоенных вариантом звеньев приведены в разделе «Теоретическая часть»).

Схемы компоновки САУ по каждому из вариантов приведены на рис. 6 – 8.

*Таблица 1*

№ компьютера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ варианта	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Элемент 1	4	4	4	1	4	3	3	3	4	1	1	1
Элемент 2	4	4	1	4	1	4	4	1	4	4	4	4
Элемент 3	3	3	4	3	1	4	4	4	3	4	1	4
Элемент 4	1	1	3	4	1	1	1	4	1	3	1	3

4. Характеристики элементов схемы вычисляются по следующим выражениям:

*Таблица 2*

№ элемента	1	2	3	4
Коэффициент усиления, $k$	$k_1 = 10 + x$	$k_2 = k_1 + 10$	$k_3 = k_1 + 5$	$k_4 = k_1 - 5$
Постоянная времени элемента, $T$	$T_1 = 0,05 \cdot x$	$T_2 = 0,08 \cdot x$	$T_3, T_4 = 0,1 \cdot x$	

где  $x$  — последняя цифра шифра студента (если  $x = 0$  — принимать  $x = 10$ )  
Индексы при величинах означают порядковые номера элементов в схеме.  
Вторая постоянная времени колебательного звена для всех вариантов принимается равной  $T = 0,2$  сек.

5. Провести исследование САУ на устойчивость.

**Исследование САУ на устойчивость по критерию Найквиста**

**ПРИМЕЧАНИЕ:** При построении схемы САУ важно не забывать, что критерий Найквиста применяется только для разомкнутых САУ, то есть исследуемая схема должна быть изображена без обратной связи.

1. Построение принципиальной схемы:

1) запустить программу моделирования работы звеньев САУ.

2) нажатием клавиши F2 вывести панель типовых звеньев САУ.

3) выбрать генератор ступенчатой функции, в параметрах генератора установить коэффициент передачи  $k = 1$ , нажать клавишу «Enter».

4) убрать панель инструментов, для чего нажать клавишу F2.

Дальнейший набор схемы осуществлять в два этапа:

а) расставить типовые звенья.

б) нарисовать связи между звеньями.

*Расстановка звеньев:*

1) отвязать курсор от выхода генератора ступенчатой функции для чего нажать клавишу F3. После выполнения операции курсор должен приобрести форму кружочка;

2) при помощи клавиш-стрелок переместить курсор-кружок в место, на котором должен быть изображен очередной типовой блок, и нажать F2;

3) на появившейся панели типовых звеньев выбрать необходимое звено и нажать клавишу «Enter»;

4) ввести значения параметров выбранного звена и нажать «Enter»;

5) нажатием клавиши «Esc» убрать панель типовых звеньев;

6) нажатием клавиши F3 освободить курсор (перо), при этом курсор должен приобрести форму кружочка;

7) перевести курсор-кружок на новое место и нажать клавишу F2 для выбора очередного типового звена и т.д.

**ПРИМЕЧАНИЕ:** в наборе типовых звеньев сумматор представлен значком  $\oplus$ .

*Прорисовка связей:*

1) подвести курсор-кружок к выходу типового звена (линия со стрелкой на конце);

2) нажатием клавиши F3 опустить перо, при этом курсор приобретет форму стрелки;

3) при помощи клавиш-стрелок клавиатуры прочертить связь с другим звеном. В момент касания курсором границы другого звена перо автоматически поднимется (курсор приобретает форму кружочка);

4) при помощи клавиш-стрелок подвести курсор-кружок к другому звену, нажать F3 и прочертить следующую связь и т.д.

2. Запустить режим построения логарифмических частотных характеристик ЛЧХ, для чего нажать функциональную клавишу F9. После нажатия клавиши все звенья схемы будут автоматически помечены латинскими буквами.

3. Нижнем левом окне аналитически записать схему соединения звеньев.

*Пример:* звенья В и С включены параллельно друг по отношению к другу, а звено А последовательно с В и С. Тогда с учетом формул из раздела «Теоретическая часть» запишем:

$$M1 = B + C;$$

$$M2 = A \cdot M1.$$

**ПРИМЕЧАНИЕ:** в одну функцию  $M$  могут быть включены только два звена и одна операция («+», «-», «·», «/»). Общее число функций равно 10 ( $M0 - M9$ ).

4. Вывести ЛАЧХ и ЛФЧХ синтезированной САУ. Для этого набрать в командной строке:  $L = M$ , где  $M$  — фун-

кция, описывающая аналитически общую схему соединения звеньев.

В рассмотренном ранее примере общая аналитическая схема соединения звеньев есть  $M2$ , тогда необходимо записать:  $L = M2$ .

5. Нажать клавишу F3 для растягивания графика на весь экран и зарисовать ЛАЧХ и ЛФЧХ в единых осях.

На основании логарифмического критерия Найквиста сделать вывод об устойчивости синтезированной САУ. Определить на графике запас устойчивости САУ по фазе  $\psi$  и амплитуде  $h$ . *Запас устойчивости по фазе* есть величина, на которую должно возрасти запаздывание по фазе в системе на частоте среза  $\omega_c$  (частота среза – это частота при которой  $20 \cdot \lg A = 0$ ) чтобы система оказалась на границе устойчивости (см. рис.3). *Запас устойчивости по амплитуде* есть величина  $h$ , на которую должна увеличиться АЧХ при  $\varphi = -180^\circ$ , чтобы САУ оказалась на границе устойчивости (см. рис. 3).

Записать, что произойдет при замыкании отрицательной обратной связи, САУ, показавшей себя неустойчивой по логарифмическому критерию Найквиста.

6. Нажать клавишу F4 и вывести на экран АФЧХ разомкнутой САУ. Зарисовать АФЧХ. На основании общего критерия Найквиста сделать вывод об устойчивости САУ.

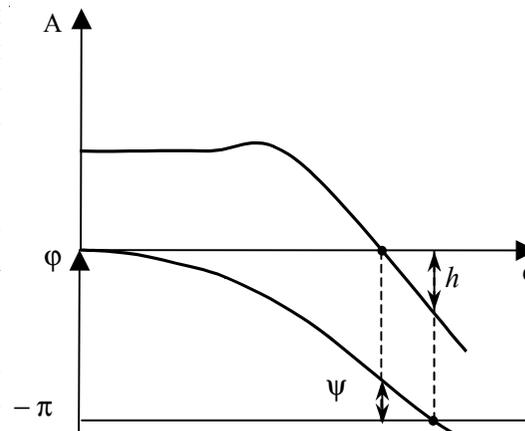


Рис. 3

**Исследование САУ на устойчивость по критерию Михайлова**

1. Записать передаточные функции звеньев, входящих в схему.
2. Пользуясь формулами, приведенными в разделе «Теоретическая часть», записать выражение для определения передаточной функции разомкнутой САУ.
3. Ввести единичную отрицательную обратную связь и записать выражение для определения передаточной функции замкнутой САУ.
4. Выписать знаменатель передаточной функции замкнутой САУ.
5. Заменить оператор Лапласа  $p$  на  $j\omega$ . Произвести преобразования, чтобы разделить действительную и мнимую части выражения:

$$D(j\omega) = \text{Re} + j \cdot \text{Im},$$

где  $\text{Re}$  — вещественная часть комплексного числа;  $\text{Im}$  — мнимая часть комплексного числа.

6. Запустить программу «Mathcad» и построить годограф Михайлова.

Порядок работы с программой следующий:

- 1) в верхнем меню установить шрифт *Arial cyr*.
- 2) чтобы вставить текст необходимо в меню выбрать пункт **ВСТАВКА>ТЕКСТОВЫЙ РЕГИОН**.
- 3) математическая область создается автоматически при щелчке в любом месте документа.
- 4) щелкнуть левой клавишей мыши в верхней части документа и набрать без пробелов:  $w:=0,1;10$  При этом в рабочей области документа должно отобразиться:

$$w := 0,1..10$$

где  $0-10$  – интервал изменения циклической частоты;  $0,1-0 = 0,1$  — шаг изменения циклической частоты.

- 5) нажать клавишу «Enter»;
- 6) ввести вещественную часть комплексного числа:  $\text{Re}(w): f$  (вместо  $f$  записывается полученная при преобразованиях действительная часть комплексного числа);
- 7) ввести мнимую часть комплексного числа:  $\text{Im}(w)$ ;
- 8) в меню выбрать пункт **ВСТАВКА>ГРАФИК>X-Y УЧАСТОК**;

- 9) на экране появится заготовка графика (см. рис. 4):  
В нижнем квадрате ввести  $\text{Re}(w)$ ;



- 10) в левом квадрате ввести  $\text{Im}(w)$ ;

- 11) щелкнуть на графике правой клавишей мыши и в контекстном меню выбрать пункт **FORMAT**;

- 12) на вкладке *X-Y Axes* поставить флажки *Grid lines* (*отображение линий сетки*);

Рис. 4

- 13) на вкладке *Labels* в поле *Title* ввести название графика и поставить флажок *Show Title* (*отобразить заголовок*);

- 14) окончательно документ должен иметь вид, представленный на рис. 1;

- 15) записать вывод об устойчивости САУ по критерию Михайлова;

- 16) распечатать результат на принтере;

- 17) запустить программу моделирования работы САУ;

- 18) собрать схему замкнутой САУ;

- 19) аналитически описать принципиальную схему;

Пример:

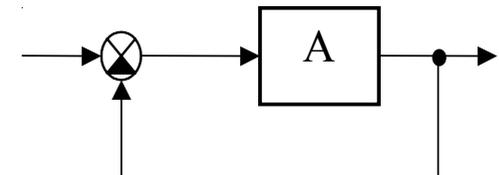


Рис. 5

Формула передаточной характеристики данной замкнутой САУ имеет вид (см. разд. «Теор. часть»):

$$W_{\text{замк}}(p) = \frac{A(p)}{1 + A(p)}$$

Тогда в командной строке необходимо записать:  
 $M0 = 1 + A$   $M1 = A / M0$   $L = M1$ ;

20) вывести на монитор графические зависимости ЛАЧХ и ЛФЧХ;

21) зарисовать графики ЛАЧХ и ЛФЧХ.

### Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы.
2. Основные формулы и определения.
3. Принципиальные схемы.
4. Графические зависимости.
5. Расчетную часть.
6. Общие выводы по работе.

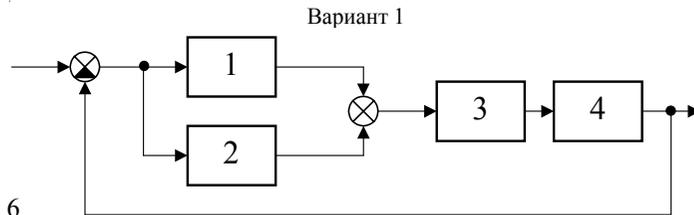


Рис. 6

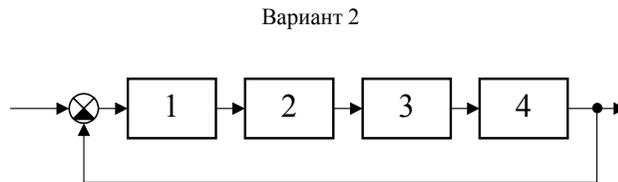


Рис. 7

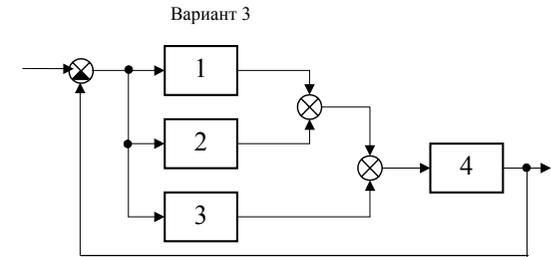


Рис. 8

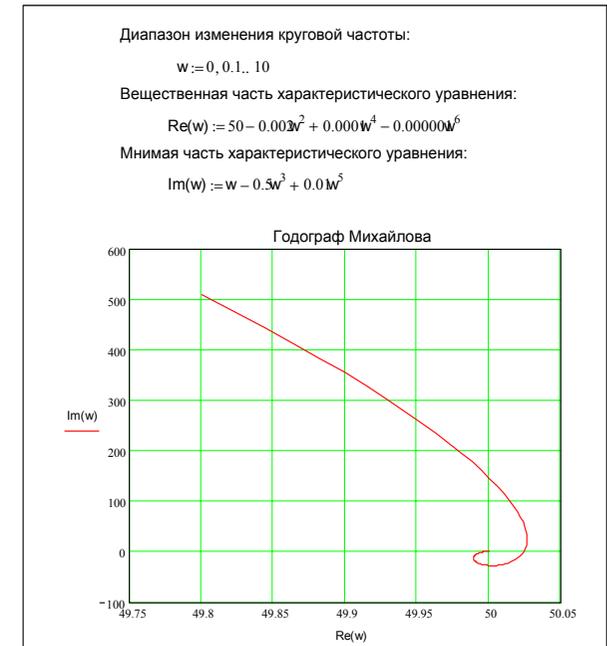


Рис. 9

### Лабораторная работа № 3

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ САУ, КОРРЕКЦИЯ САУ

*Цель работы:* определение основных показателей качества регулирования САУ с использованием прямых и косвен-

ных критериев; синтез и исследование САУ с последовательной коррекцией; оптимизация параметров САУ.

### Теоретическая часть

Кроме обеспечения устойчивости САУ необходимо обеспечить требуемое качество переходного процесса управления.

Качество переходного процесса управления оценивают по переходной функции  $h(t)$ , представляющей собой реакцию системы на внешнее единичное ступенчатое воздействие.

Основными показателями качества являются:

1. Время регулирования.
2. Максимальное перерегулирование.
3. Частота колебаний.
4. Число колебаний.
5. Максимальная скорость регулируемой величины.
6. Колебательность.
7. Статическая погрешность в установившемся режиме.

Время регулирования  $t_p$  — зависит от длительности переходного процесса. Оно измеряется от момента внешнего возмущения (единичного скачка) до момента, когда отклонение регулируемой величины  $\varepsilon$  от нового установившегося значения  $h_{уст}$  не превышает  $\varepsilon \leq (0,03 \div 0,05) \cdot h_{уст}$ .

Максимальное перерегулирование (выброс)  $\Delta h$  — это максимальное отклонение регулируемой величины относительно нового установившегося значения  $h_{уст}$ :

$$\sigma = \frac{\Delta h}{h_{уст}} \cdot 100\%$$

Количество перерегулирований  $\delta$  определяется количеством максимумов, больших по значению, чем  $m = h_{уст} + \varepsilon$ .

Колебательность системы оценивают как отношение двух соседних максимумов:

$$\delta' = \frac{y_{\max 2}}{y_{\max 1}}$$

Статическая погрешность  $\varepsilon_{см}$  — разность между установившимся значением сигнала на входе с установившимся значением сигнала на выходе:  $\varepsilon_{см} = 1 - h_{уст}$ .

Максимальная скорость регулируемой величины  $v$ :

$$v = \frac{dh}{dt} = tg\alpha$$

Максимальная скорость регулируемой величины графически определяется как тангенс угла наклона переходной характеристики в точке первого пересечения с линией установившегося значения  $h_{уст}$ .

Широкое распространение имеют косвенные критерии определения качества переходного процесса.

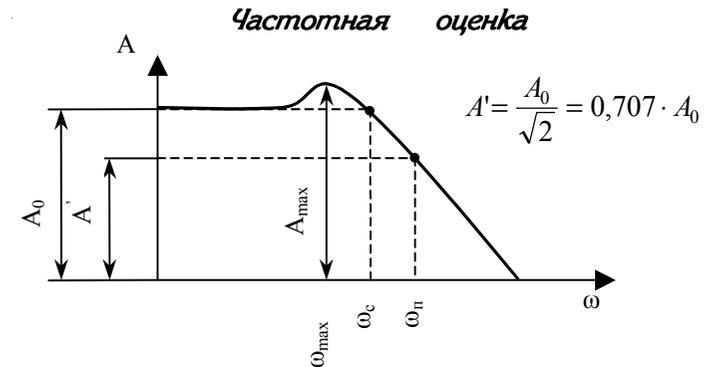


Рис. 10

$\omega_c$  — частота среза;

$\omega_n$  — полоса пропускания;

$\omega_{\max}$  — частота резонанса

Данная оценка позволяет судить о качестве регулирования по АЧХ замкнутой САУ.

Установлено, что чем больше  $A_{\max}$ , тем более колебательным является переходный процесс.

Показатель колебательности:

$$M = \frac{A_{\max}}{A_0}.$$

Обычно  $M = 1,2 \div 1,5$ .

При малых  $M$  имеет место большое время регулирования, а при больших увеличивается перерегулирование и снижается устойчивость САУ.

Период колебания на резонансной частоте:

$$T = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{\text{рез}}}.$$

Длительность переходного процесса:

$$t_n = N \cdot T,$$

где  $N$  — число колебаний (обычно  $1 \div 2$ ).

Частота среза определяет диапазон частот вынужденных колебаний, которые САУ пропускает без ослабления.

Полоса пропускания влияет на точность и быстродействие системы. Чем  $\omega_n$  больше, тем больший спектр входного сигнала передается без искажений и выше быстродействие.

Улучшения качества процесса регулирования достигаются коррекцией САУ.

Коррекция бывает параллельная и последовательная.

### **Последовательная коррекция**

При последовательной коррекции корректирующие звенья включают последовательно со звеньями САУ. Часто применяемым последовательным корректирующим звеном является звено со следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{корр}}(p) = k \cdot \frac{T_1 \cdot p + 1}{T_2 \cdot p + 1},$$

при  $T_2 > T_1$  — звено является дифференцирующим;  $T_2 < T_1$  — звено является интегрирующим.

Частота, при которой звено создает максимальный сдвиг фазы определяется как:

$$\omega_{\max} = \frac{1}{\sqrt{T_1 \cdot T_2}}.$$

Сдвиг фазы на выходе звена определяется как:

$$\varphi_{\max} = \arctg \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} - \arctg \sqrt{\frac{T_2}{T_1}}.$$

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 3**

1. Ознакомиться с основными формулами и определениями из раздела «Теоретическая часть», записать их в рабочую тетрадь.

2. Запустить программу моделирования звеньев САУ.

3. Собрать исходную схему САУ по схеме, приведенной на рис.11. Параметры звеньев следующие:

— первая постоянная времени колебательного звена:

$$T_1 = 0,0x;$$

— вторая постоянная времени колебательного звена:

$$T_2 = 2 \cdot 0,0x \text{ (при } x=0 \text{ принять } x=15);$$

— параметр  $D = \frac{T_2}{2 \cdot T_1};$

— коэффициент передачи колебательного звена:  $k = x0;$

— коэффициент передачи пропорционального звена,

включенного в цепь обратной связи:  $k_0 = \frac{1}{k};$

—  $x$  — последняя цифра шифра студента;

— коэффициент передачи пропорционального звена, включенного повторителем:  $k_n = 1$  (с него снимается выходной сигнал при моделировании).

4. Нажатием клавиши F7 запустить режим «Моделирование».

5. Нажать клавишу F2 и из появившегося списка методов интегрирования выбрать метод Фельберга.

6. Установить погрешность вычисления переходной характеристики 0,01, начальное время 0 сек, конечное время 3 сек. Нажать клавишу «Enter», чтобы применить значения параметров.

7. Нажать клавишу F3 (счет), а затем клавишу F6 (график). Выбрать звено повторителя  $k_n$  и нажать клавишу «Enter». На экран будет выведена переходная характеристика САУ.

8. В случае, если за 3 сек. переходный процесс не закончится, нажать клавишу «Esc», а затем F2 и увеличить время интегрирования. Подтвердить ввод нажатием клавиши «Enter». Для неустойчивого процесса общее время интегрирования 6 сек. Далее повторить пункт 7.

9. Зарисовать график переходного процесса (отображение графика меняется клавишей F5).

10. Выйти из программы моделирования.

11. Вновь запустить программу моделирования и собрать САУ с последовательной коррекцией по схеме 2.

12. Параметры корректора следующие:

коэффициент передачи корректора  $k_k = 1$ ;

постоянная времени  $T_1 = 0,1$  сек;

постоянная времени  $T_2 = 0,0x$  сек. (при  $x = 0$  принять  $T_2 = 0,02$ ).

13. Повторить моделирование для чего последовательно выполнить пункты 4–7.

14. Путем изменения значения постоянной времени  $T_2$  получить оптимизированный переходный процесс.

15. Зарисовать график оптимизированного переходного процесса.

16. По графику определить время регулирования, максимальное перерегуливание, количество перерегулирований и статическую погрешность САУ. Вычислить сдвиг фазы корректора и резонансную частоту.

17. Составить аналитическую схему САУ, вывести графические зависимости ЛАЧХ и ЛФЧХ.

18. По графическим зависимостям определить показатель колебательности, резонансную частоту, длительность переходного процесса, частоту среза и полосу пропускания.

### Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Название и цель работы;
2. Основные формулы и определения;
3. Принципиальные схемы моделей.
4. Графические зависимости.
5. Расчетную часть.
6. Общие выводы.

Схема 1

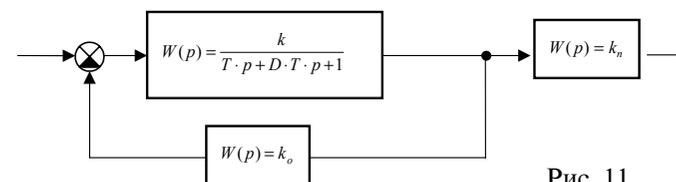


Рис. 11

Схема 2

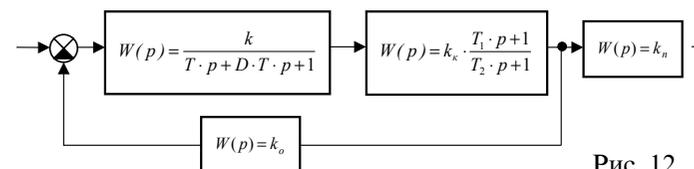


Рис. 12

## Лабораторная работа № 4

**Цель работы:** практическое изучение принципов кодирования и декодирования сигналов, синтез схем преобразователей кодов.

### Теоретическая часть

В системах телемеханики сообщения передаются по линиям связи.

*Кодовым словом* называется конкретная комбинация импульсов тока, образующих линейный сигнал.

*Кодом* называется множество кодовых слов, используемых для передачи сообщений.

*Длина* кода  $n$  — число разрядов, содержащихся в коде.

*Емкость* кода  $S$  — число сообщений, которые передаются данным кодом (число используемых кодовых слов).

Общая классификация кодов:

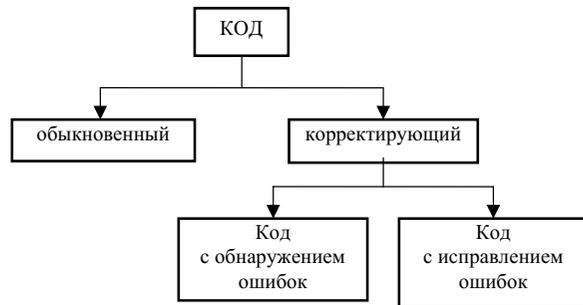


Рис. 13

### Обыкновенные коды

В обыкновенных кодах для передачи сообщений используют все возможные кодовые слова.

Емкость двоичного обыкновенного кода длиной  $n$  равна:

$$S = 2^n.$$

Откуда требуется для передачи  $S$  сообщений число разрядов обыкновенного кода:  $n = \lceil \log_2 S \rceil + 1$

(обратные прямоугольные скобки означают — отбросить дробный остаток от деления).

Избыточность обыкновенного кода  $R = 0$ .

Основным недостатком обыкновенного кода является то, что вероятность возникновения ошибки при передаче сообщений обыкновенным кодом линейно возрастает с увеличением длины кода.

К достоинствам обыкновенных кодов относятся наименьшая длина среди всех кодов и простота кодирующей и декодирующей аппаратуры.

Упрощенная принципиальная схема кодера (шифратора) обыкновенного кода на семь сообщений ( $S = 7$ ) представлена на рис. 14, а декодера (дешифратора) — на рис. 15.

Длина кода при этом составляет:  $n = \lceil \log_2 7 \rceil + 1 = 3$ .

### Корректирующие (избыточные) коды

Код является *избыточным*, если для передачи сообщений используются *не все возможные кодовые слова*:

$$S < 2^n. \quad (2)$$

Поэтому свойство коррекции ошибок является следствием избыточности кодов.

Коррекция ошибок бывает двух видов: обнаружение и исправление. При обнаружении устанавливается факт наличия ошибки, но не указываются номера искаженных разрядов. При исправлении эти номера могут быть определены и исправлены.

*Кодовым расстоянием (расстоянием по Хэммингу)  $d$*  называется минимальное число разрядов, которыми различаются два кодовых слова.

*Кратностью ошибки  $t$*  называется число искаженных разрядов.

Условие обнаружения кодом ошибок кратности  $t$ :

$$d \geq t + 1.$$

Условие исправления кодом ошибок кратности  $t$ :

$$d \geq 2 \cdot t + 1.$$

Условие одновременного исправления ошибок кратности  $t$  и обнаружения ошибок кратности  $q$  ( $q \geq t$ ):

$$d \geq t + q + 1.$$

### **Коды с обнаружением ошибок**

*Равновесный код (код с постоянным числом единиц).*

У равновесного кода все кодовые слова имеют одинаковую длину  $n$  разрядов и постоянное число единиц  $m$ .

Общее число разрешенных комбинаций равновесного кода вычисляется по формуле:

$$S = C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!},$$

где  $m$  — число единиц в равновесном коде.

### **Равновесный код является неразделимым**

При приеме подсчитывается число единиц  $i$ , если оно равно  $m$ , то сообщение принимается.

Код обнаруживает ошибки, нарушающие вес:

- 1) все одиночные ошибки;
- 2) ошибки нечетной и некоторые ошибки четной кратности;

Код не обнаруживает ошибки четной кратности, у которых число искажений вида  $0 > 1$  равно числу искажений  $1 > 0$ .

*Пример:* общее число передаваемых схемой сообщений при длине кода  $n = 4$  и числе единиц  $m = 2$ :

$$S = \frac{4!}{2!(4-2)!} = 6.$$

Принципиальные схемы кодирующего и декодирующего устройств равновесного кода на шесть сообщений приведены на рис. 16, 17 соответственно. Декодирующее устройство равновесного кода можно получить из схемы декодера обыкновенного кода путем исключения элементов, формирующих неиспользуемые выходные функции.

### **Код с контролем на четность**

В коде с контролем на четность все разрешенные кодовые слова содержат четное число единиц. Для его формирования к обыкновенному коду добавляют один избыточный (контрольный) разряд, в который записывается: — лог. «1» при нечетном числе единиц в исходном обыкновенном коде, — лог. «0» при четном числе единиц в обыкновенном коде.

Так как разряды кода четко разделены на контрольные и информационные, данный код является *разделимым*.

При приеме кода подсчитывают число единиц. Если оно четно, то сообщение считается принятым верно.

Характеристика кода с контролем на четность:

$$S = 2^{n-1}.$$

Данный способ кодирования позволяет обнаруживать ошибки, нарушающие четность числа единиц (ошибки нечетной кратности).

*Пример:* при длине кода с контролем четности  $n = 4$  максимальное число передаваемых сообщений равно:

$$S = 2^{4-1} = 8.$$

Принципиальные схемы кодирующего и декодирующего устройств кода с контролем четности на семь сообщений приведены на рис. 18, 19 соответственно. Схема кодера состоит из двух частей:

1. блок формирования информационной части кода, представляющий собой шифратор обыкновенного кода (обозначен буквой Ш);

2. блок формирования контрольного разряда, представляющий собой многовходовый сумматор по модулю 2.

Схема дешифратора построена по тем же принципам, что и схема дешифратора равновесного кода.

### **Корреляционные коды**

У этих кодов существует зависимость между определенными элементами кода.

### ***Код с повторением***

Получают путем двойного повтора слова обыкновенного кода. Код с повторением является делимым.

При приеме необходимо сравнить одинаковые элементы обеих частей кода и, если они совпадают, то сообщение принимается.

Код не обнаруживает только ошибки четной кратности (в противоположные логические состояния одновременно переходят четное число разрядов).

Декодер кода с повторением содержит декодер обыкновенного кода и схемы сравнения.

### ***Код Бауэра (инверсный код)***

Код образуют по следующему правилу. Если в исходном слове обыкновенного кода содержится четное число единиц, то контрольные разряды повторяют информационные. В противном случае контрольные разряды являются инверсными по отношению к информационным разрядам.

### ***Парафазный код***

В парафазном коде корреляция существует между двумя соседними разрядами. Каждый разряд слова обыкновенного кода заменяется двумя разрядами по правилу:  $0 \rightarrow 01$ ,  $1 \rightarrow 10$ .

Параметры кодов с повторением, Бауэра и парафазного:

$$S = 2^{n/2}.$$

### ***Код с суммированием (код Бергера)***

Код строится по следующим правилам:

1) сообщения кодируются обыкновенным кодом. Число информационных разрядов при этом определяется по формуле:  $n = \lceil \log_2 S \rceil + 1$ ;

2) число контрольных разрядов определяется как:  $k = \lceil \log_2 (n+1) \rceil + 1$ ;

3) в контрольных разрядах записывается двоичное число, десятичный эквивалент которого равняется числу нулей в информационных разрядах.

При приеме число нулей в информационных разрядах сравнивается с числом, записанным в контрольных разрядах.

Этот код позволяет обнаруживать однонаправленные ошибки любой кратности. Однонаправленными называются ошибки, содержащие только искажения вида  $1 \rightarrow 0$  или  $0 \rightarrow 1$ . Поэтому код применяется преимущественно в тех случаях, когда в канале связи возникают помехи, длительность которых больше длительности одного импульса тока.

### ***КОДЫ С ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК***

#### ***Код Хемминга***

Основной целью построения кода Хемминга формирования такого кода, который в случае его принятия с одиночной ошибкой позволял бы обнаружить сбойный разряд и, при необходимости, его исправить.

Обозначим:

- длину слова Хемминга —  $n$ ;
- длину контрольной части кода —  $k$ ;
- длину информационной части кода —  $m$ .

Очевидно, что:

$$n = m + k$$

1. Представим слово Хемминга в виде:

$f_9$	$f_8$	$f_7$	$f_6$	$f_5$	$f_4$	$f_3$	$f_2$	$f_1$
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

где 1–9 – номера разрядов кода Хемминга.

2. Длину информационной части кода Хемминга определим по формуле:

$$m = \lceil \log_2 S \rceil + 1.$$

Пример: необходимо передать  $S = 10$  сообщений, тогда:

$$m = \lceil \log_2 10 \rceil + 1 = \lceil 3.322 \rceil + 1 = 4.$$

Так как емкость 4-х разрядного кода равна  $S_{\max} = 2^m = 2^4 = 16$ , то для передачи 10 сообщений будут использованы не все возможные комбинации. Поэтому можно выбрать любые. Например, возможна следующая таблица кодирования 10 сообщений:

Таблица 3

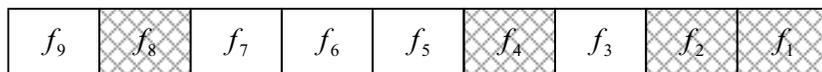
№ сообщения	разряды			
	$m_4$	$m_3$	$m_2$	$m_1$
	вес			
	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0

3. Контрольные разряды в слове Хемминга расположены на определенных местах между информационными. За контрольные разряды принимаются разряды, номер которых равен целой степени числа  $2^a$  ( $a = 0, 1, \dots, M$ ). Это разряды:

$$2^0 = 1 \rightarrow f_1; \quad 2^2 = 4 \rightarrow f_4;$$

$$2^1 = 2 \rightarrow f_2; \quad 2^3 = 8 \rightarrow f_8.$$

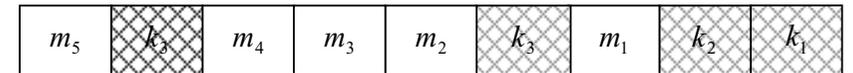
4. Выделим в слове Хемминга контрольные разряды:



5. С учетом старшинства разрядов (старшинство разряда возрастает в направлении справа налево) расставим номера контрольных разрядов:



6. Информационные разряды расположены между контрольными. Расставим номера информационных разрядов в порядке их старшинства, получим:



7. В информационные разряды запишем передаваемое кодовое слово (см. табл. кодирования сообщений).

Пример: в рассмотренном ранее примере число информационных разрядов кода составляет  $m = 4$ . Тогда длина кода Хемминга с учетом мест под контрольные разряды составит  $n = 7$ . Общий вид слова, закодированного по Хеммингу, будет:



8. Чтобы определить значения контрольных разрядов построим таблицу для определения контрольных сумм. Число контрольных сумм соответствует числу контрольных разрядов:

Таблица 4

Разряды слова	Контрольные суммы				
	$S_n$	...	$S_3$	$S_2$	$S_1$
$k_1$	0	0	0	0	1
$k_2$	0	0	0	1	0
$m_1$	0	0	0	1	1
$k_3$	0	0	1	0	0
$m_2$	0	0	1	0	1
$m_3$	0	0	1	1	0
$m_4$	0	0	1	1	1
...	...	...	...	...	...

Таблица контрольных сумм заполняется аналогично таблице истинности  $n$  — входового элемента, причем первая строка (все нули) исключается.

Каждая контрольная сумма определяется как сумма по модулю 2 (исключающее «ИЛИ») значений разрядов, имеющих единицу в ее столбце:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_1 = k_1 \oplus m_1 \oplus m_2 \oplus m_4 \oplus \dots \\ S_2 = k_2 \oplus m_1 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus \dots \\ S_3 = k_3 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus \dots \\ \dots \end{array} \right. \quad (3)$$

Как видно, в каждую контрольную сумму входит только один контрольный разряд. И каждый контрольный разряд входит только в одну контрольную сумму. Контрольная сумма равна «1», если число единиц в сумме нечетно, и равна «0», если четно.

9. Принято значения всех контрольных сумм при передаче устанавливать  $S=1$ . Поэтому по заданному значению контрольных сумм доопределяется значение контрольного разряда

$$\left\{ \begin{array}{l} k_1 = 1 \oplus m_1 \oplus m_2 \oplus m_4 \oplus \dots \\ k_2 = 1 \oplus m_1 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus \dots \\ k_3 = 1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus \dots \\ \dots \end{array} \right. \quad (4)$$

10. Вычисленные значения контрольных разрядов записываются на свои места в слово Хемминга. На этом процедура кодирования заканчивается.

*Примечание:* Формула (4) служит для синтеза блока формирования контрольных разрядов кода Хемминга (передающий конец).

11. Декодирование заключается в вычислении контрольных сумм по формуле (3):

а) если все контрольные суммы равны заданному значению  $S=1$ , то ошибки нет.

б) в случае, если хотя бы одна из контрольных сумм не равна заданному значению, все контрольные суммы рассматриваются как разряды двоичного числа. При этом номер искаженного разряда есть десятичный эквивалент двоичного, образованного инвертированными контрольными суммами  $\{\overline{S_n} \dots \overline{S_4} \overline{S_3} \overline{S_2} \overline{S_1}\}$ .

Исправление ошибки заключается в изменении значения искаженного разряда на противоположное.

*Примечание:* по формуле (3) осуществляется синтез блока вычисления контрольных сумм (приемный конец).

Код Хемминга исправляет ошибки кратности 1 и обнаруживает ошибки кратности 2, однако одновременно исправлять одиночные и обнаруживать двойные ошибки код не может, так как эти ошибки могут оказаться неразличимыми.

Поэтому, чтобы код Хемминга одновременно исправлял одиночные ошибки и обнаруживал двойные, добавляется еще один контрольный разряд, проверяющий четность единиц в информационных и основных контрольных разрядах:

$$m_{K+1} = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus m_5 \oplus \dots$$

Кодирующая аппаратура содержит:

- 1) шифратор обыкновенного кода, который служит для передачи информационной части кода;
- 2) блок формирования контрольных разрядов, служащий для передачи контрольной части кода.

Декодирующая аппаратура содержит:

- 1) дешифратор обыкновенного кода;
2. блок вычисления контрольных сумм, служащий для проверки правильности принятого кода;
- 3) блок коррекции, служащий для исправления ошибки.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ № 4

1. Ознакомиться с основными формулами и определениями из раздела «Теоретическая часть».
2. Запустить программу моделирования электронных схем «Work bench».
3. По последней цифре шифра студента определить вариант выполняемой работы:

Таблица 5

Цифра	№ варианта
0	1
1	2
2	3
3	1
4	2
5	3
6	1
7	2
8	3
9	1

4. По варианту выбрать список выполняемых лабораторных работ:

Таблица 6

№ варианта	Названия работ
1	«Исследование схем шифратора и дешифратора обыкновенного кода» (файл «simplecode.ewb») «Синтез шифратора и дешифратора кода Хемминга на 3 сообщения» (файл «hemming.ewb»)
2	«Исследование схем шифратора и дешифратора равновесного кода» (файл «equalcode.ewb») «Синтез шифратора и дешифратора кода Хемминга на 3 сообщения» (файл «hemming.ewb»)
3	«Исследование схем шифратора и дешифратора кода с контролем на четность» (файл «code2.ewb») «Синтез шифратора и дешифратора кода Хемминга на 3 сообщения» (файл «hemming.ewb»)

5. Выполнить предложенные в списке лабораторные работы.

### *Исследование схем шифратора и дешифратора обыкновенного кода*

1. Открыть файл «simplecode.ewb».
2. Найти на схеме: блок шифрации, модуль формирования помех в линии, блок дешифрации. Пользуясь приведенными в пособии рисунками выяснить назначение и принципы работы узлов схемы:

а) блок шифрации обыкновенного кода собран на элементах DD1, DD2 (в одном корпусе 2 элемента 4ИЛИ) по схеме, приведенной на рис. 1. Чтобы определить назначение выводов элемента необходимо навести на него указатель, щелкнуть правой клавишей мыши и выбрать в контекстном меню пункт «Help»;

б) для формирования команд служат ключи 1–7, управление которыми осуществляется одноименными клавишами клавиатуры. Нижнее положение ключей соответствует отсутствию команды, а верхнее – передаче команды. Схема позволяет передавать одновременно только одну команду, поэтому при выполнении работы необходимо следить за тем, чтобы в верхнем положении находилось не более одного ключа;

в) передаваемая команда отображается линейкой индикаторов HL1. Код, формируемый при передаче команды, отображается на линейке индикаторов HL2. Верхний разряд на всех индикаторах схемы является младшим;

г) выходы шифратора обозначены контрольными точками K1-K3;

д) линия связи имитируется проводниками, расположенными между контрольными точками K1-K3 и K4-K6;

е) неисправности в линии связи имитируются блоком ключей:

Z, X, C – замыкание на «+»;

V, B, N – обрыв .

При верхнем положении ключей неисправность в линии отсутствует;

ж) Дешифратор обыкновенного кода собран на элементах DD3-DD8 в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2;

з) входы дешифратора присоединены к контрольным точкам К4-К6;

и) принимаемый дешифратором код отображается линейкой HL3, дешифрированная команда отображается линейкой HL4, причем первой команде соответствует верхний сегмент, а последней — нижний.

1. Запустить режим моделирования работы схемы для чего подвести курсор мыши к правому верхнему углу экрана и, щелкнув по выключателю, перевести его в положение «1».

2. Перевести ключи Z, X, C, V, B, N в верхнее положение.

3. Передавая при помощи ключей К1–К7 различные команды промоделировать работу шифратора и дешифратора.

4. Заполнить таблицу состояния линеек индикаторов при передаче различных команд (записать номера светящихся разрядов линеек) (табл. 7):

Таблица 7

№ команды	HL1	HL2	HL3	HL4	Принято (да/нет)	Истина/ложь
1						
..						
7						

5. Ответить на вопросы:

Что произойдет, при попытке одновременной передачи двух команд?

Почему на практике нежелательно использование приведенной схемы шифратора?

6. При помощи ключей модуля канала связи смоделировать все одиночные неисправности в линиях связи, заполнить табл. 8:

Таблица 8

№ команды	HL1	HL2	Буква ключа	HL3	HL4	Принято (да/нет)	Истина/ложь
1			Z				
..							
7							

7. Определить соотношение числа верно принятых сообщений при одиночной неисправности к числу верно принятых.

8. При помощи ключей модуля канала связи смоделировать 3 любые двойные неисправности канала связи и заполнить таблицу, аналогичную предыдущей.

9. Сделать вывод о помехозащищенности обыкновенного кода. Ответить на вопросы:

Обнаруживаются ли ошибки при данном способе кодирования?

В каких случаях можно применить данный способ кодирования?

Является ли обыкновенный код делимым?

Имеет ли обыкновенный код избыточность?

### Исследование схем шифратора и дешифратора равновесного кода

1. Открыть файл «equalcode.ewb».

2. Найти на схеме: блок шифрации, модуль формирования помех в линии, блок дешифрации. Пользуясь приведенными в пособии рисунками выяснить назначение и принципы работы узлов схемы:

а) блок шифрации кода собран на элементах DD1, DD2 (в одном корпусе 2 элемента 4ИЛИ);

б) для формирования команд служат ключи 1–6. Нижнее положение ключей соответствует отсутствию команды, а верхнее – передаче команды. Схема позволяет передавать одновременно только одну команду;

в) передаваемая команда отображается линейкой инди-

каторов HL1. Код, формируемый при передаче команды, отображается на линейке индикаторов HL2. Верхний разряд на всех индикаторах схемы является младшим;

г) выходы шифратора обозначены контрольными точками K1–K4;

д) линия связи имитируется проводниками, расположенными между контрольными точками K1–K4 и K5–K8;

е) дешифратор собран на элементах DD3–DD9 в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4;

ж) входы дешифратора присоединены к контрольным точкам K5–K8;

з) принимаемый дешифратором код отображается линейкой HL3. Дешифрированная команда отображается линейкой HL4.

3. Запустить режим моделирования работы схемы для чего подвести курсор мыши к правому верхнему углу экрана и, щелкнув по выключателю, перевести его в положение «1».

4. Скоммутировать ключи модуля канала связи таким образом, чтобы неисправность в линии отсутствовала.

5. Передавая при помощи ключей K1–K6 различные команды промоделировать работу шифратора и дешифратора.

6. Заполнить таблицу состояния индикаторов (аналогична табл. 7).

7. Выполнить пункты 8–10 лабораторной работы «Исследование схем шифратора и дешифратора обыкновенного кода».

8. Сделать вывод о помехозащищенности кода. Ответить на вопросы:

Обнаруживаются ли ошибки при данном способе кодирования (если ошибки обнаруживаются, то объяснить механизм обнаружения)?

Является ли код делимым?

Имеет ли код избыточность?

### *Исследование схем шифратора и дешифратора кода с контролем четности*

1. Открыть файл «code2.ewb».

2. Найти на схеме: блок шифрации, модуль формирования помех в линии, блок дешифрации. Пользуясь приведенными в пособии рисунками выяснить назначение и принципы работы узлов схемы:

а) блок шифрации информационной части кода собран на элементах DD1, DD2 (в одном корпусе 2 элемента 4ИЛИ) по схеме, приведенной на рис.1. Блок формирования контрольного разряда собран на элементах DD3, DD4;

б) для формирования команд служат ключи 1–7;

в) передаваемая команда отображается линейкой индикаторов HL1. Код, формируемый при передаче команды, отображается на линейке индикаторов HL2;

г) выходы шифратора обозначены контрольными точками K1–K4;

д) линия связи имитируется проводниками, расположенными между контрольными точками K1–K4 и K5–K8;

е) дешифратор собран на элементе DD5, который представляет собой дешифратор обыкновенного кода, выполненный моноблоком. Отличительной особенностью реализованного дешифратора от дешифратора обыкновенного кода является то, что у него задействованы не все выходы;

ж) входы дешифратора присоединены к контрольным точкам K5–K8;

з) принимаемый дешифратором код отображается линейкой HL3. Дешифрированная команда отображается линейкой HL4.

3. Запустить режим моделирования работы схемы для чего подвести курсор мыши к правому верхнему углу экрана и, щелкнув по выключателю, перевести его в положение «1».

4. Скоммутировать ключи модуля формирования помех таким образом, чтобы неисправность в линии отсутствовала.

5. Передавая при помощи ключей K1-K6 различные команды промоделировать работу шифратора и дешифратора.

6. Выполнить пункты 8–10 лабораторной работы «Исследование схем шифратора и дешифратора обыкновенного кода».

Сделать вывод о помехозащищенности кода. Ответить на вопросы п.8 лабораторной работы «Исследование схем шифратора и дешифратора равновесного кода.»

### **Синтез схем шифратора и дешифратора кода Хемминга на 3 сообщения**

1. Открыть файл «hemming.ewb».  
 2. Ознакомиться с заготовкой схемы.  
 3. Ключи 1–3 предназначены для передачи команд. Верхнее положение соответствует передаче команды, а нижнее ее отсутствию. Запрещается одновременно передавать более одной команды.

4. Шифратор обыкновенного кода собран на элементах DD1, DD2 (логика «ИЛИ»). Функции выходов шифратора обыкновенного кода представлены в табл. 9.

5. В качестве логической «1» используется «+» элемента питания.

Таблица 9

№ команды	DD1	DD2
1	1	0
2	0	1
3	1	1

6. Выходы синтезируемого шифратора кода Хемминга необходимо подключить к контрольным точкам K1–K5. Необходимо иметь в виду, что младшим разрядом является разряд, подключаемый к контрольной точке K1, а старшим – разряд, подключаемый к контрольной точке K5.

7. Линейка HL1 отображает передаваемую команду. Линейка HL2 предназначена для отображения формируемого кода Хемминга.

8. Модуль формирования помех собран на ключах A,S,D,F,G,Q,W,E,R,T.

9. Входы дешифратора контрольной суммы кода Хемминга необходимо подключить к контрольным точкам K6–K10. Контрольная точка K6 является младшим разрядом.

10. На элементе DD3 собран дешифратор двоичного кода (служит для преобразования двоичного кода в десятичный). Информационными входами дешифратора являются входы A0–A3, которые подключены к контрольным точкам K11–K13. Младший разряд синтезируемого дешифратора контрольной суммы необходимо подключать к контрольной точке K11, а старший — к K13.

11. Линейка HL3 предназначена для отображения кода, поступающего на вход дешифратора контрольной суммы. Линейка HL4 предназначена для отображения контрольной суммы кода Хемминга. Линейка HL5 предназначена для отображения дешифрованного номера сбойного разряда (линии связи). Верхние индикаторы всех линеек соответствуют младшим разрядам, а нижние — старшим.

12. На основании формул, представленных в разделе «Теоретическая часть» записать выходные функции контрольных разрядов шифратора кода Хемминга, а также выходные функции дешифратора контрольных сумм кода Хемминга.

13. Нажать на кнопку «Logic gates» на панели типовых элементов. Панели «Logic gates» приняты обозначения, приведенные в табл. 10.

14. Собрать принципиальные схемы шифратора контрольной части кода Хемминга и дешифратора контрольных сумм кода Хемминга используя типовые логические элементы (установка элементов в принципиальную схему осуществляется перетаскиванием необходимого элемента с панели «Logic gates» при нажатой левой клавиши «мыши»).

15. Подключить входы и выходы шифратора и дешифратора к контрольным точкам.

Таблица 10

Обозначено	Аналог
AND	И
OR	ИЛИ
NAND	НЕ
NOR	ИЛИ-НЕ
XOR	Искл.ИЛИ
XNOR	Искл.ИЛИ-НЕ

16. Нажатием выключателя, расположенного в правом верхнем углу экрана, запустить собранную схему на моделирование.

17. Скоммутировать ключи модуля формирования помех таким образом, чтобы неисправность в линии отсутствовала.

18. Передавая команды при помощи ключей К1–К3 промоделировать работу шифратора и дешифратора.

19. Заполнить таблицу состояния линеек индикаторов при передаче различных команд (записать номера светящихся разрядов линеек):

Таблица 11

№ команды	HL1	HL2	HL3	HL4	HL5	ошибка (да/нет)
1						
..						
3						

20. На основании заполненной таблицы проконтролировать правильность монтажа схемы.

21. При помощи ключей модуля канала связи смоделировать все одиночные неисправности в линиях связи, заполнить табл. 12:

Таблица 12

№ команды	HL1	HL2	№ сбойного разряда	Буква ключа	HL3	HL4	HL5	ошибка (да/нет)
1				А				
..								
3								
1				S				
..								

При заполнении таблицы учесть, что номера разрядов присваиваются для линии К1–К6 – 1-ый разряд, К5–К10 – 5-ый разряд.

22. В заполненной таблице сравнить содержимое столбцов «№ сбойного разряда» и «HL5». Ответить на вопросы:

В каких случаях сбойный разряд обнаруживается, а в каких – нет?

Можно ли по содержимому линейки HL5 правильно судить о номере сбойного разряда?

23. При помощи ключей модуля канала связи смоделировать 3 любые двойные неисправности канала связи и заполнить таблицу, аналогичную предыдущей.

24. Ответить на вопросы:

Может ли код Хемминга правильно обнаруживать сбойные разряды при двойной ошибке?

Обнаруживается ли факт двойной ошибки?

Является ли код Хемминга делимым?

25. Сделать общие выводы по проделанной работе.

26. Оформить отчет.

### Оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Номер варианта.
2. Основные формулы и определения из раздела «Теоретическая часть».
3. Название и цель каждой выполненной лабораторной работы.
4. Заполненные таблицы состояний исследуемых схем.
5. Расчетную часть по каждой проделанной лабораторной работе.
6. Для лабораторной работы «Синтез схем шифратора и дешифратора кода Хемминга на 3 сообщения» принципиальную схему шифратора и дешифратора кода Хемминга.
7. Общие выводы по работе.

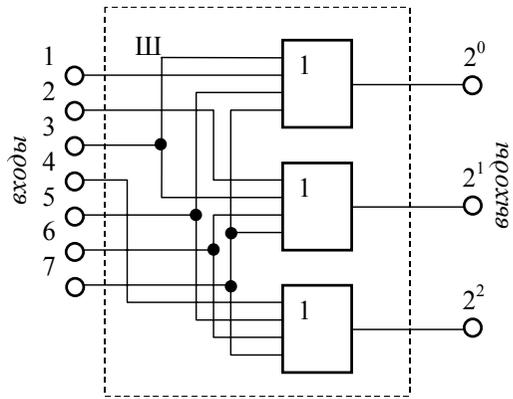


Рис. 14. Схема шифратора обычного кода на семь сообщений

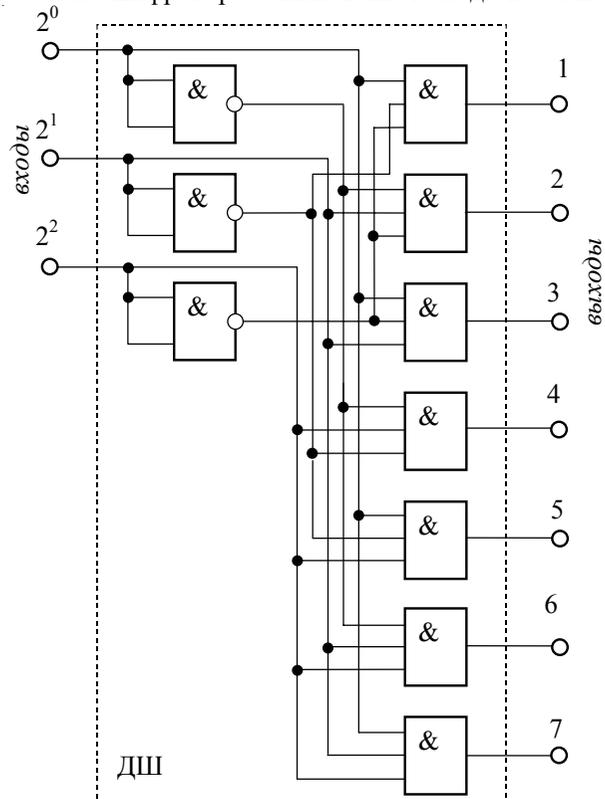


Рис. 15. Схема дешифратора обычного кода на семь сообщений

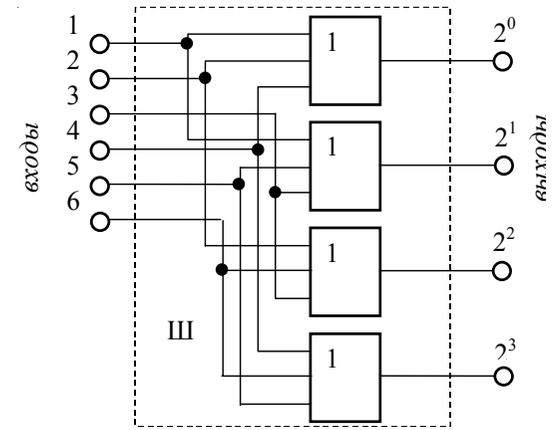


Рис. 16. Схема шифратора равновесного кода на шесть сообщений

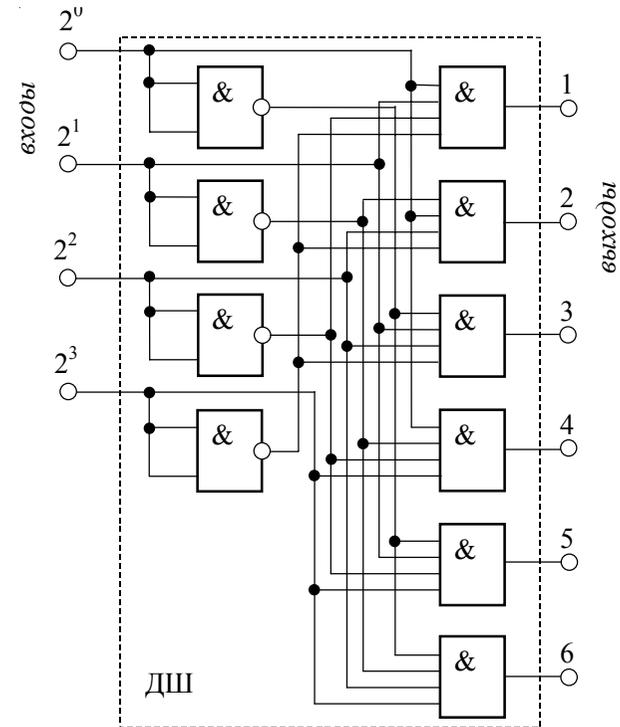


Рис. 17. Схема дешифратора равновесного кода на шесть сообщений

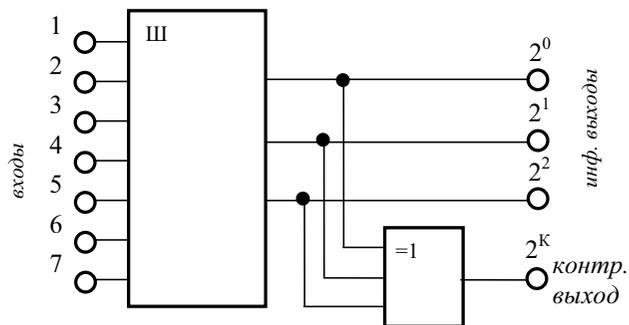


Рис. 18. Схема шифратора кода с проверкой на четность на семь сообщений

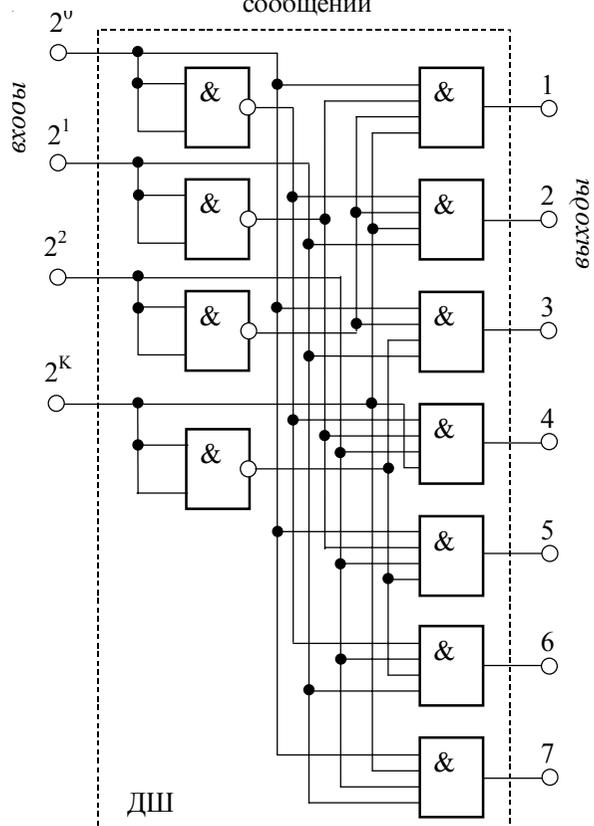


Рис. 19. Схема дешифратора кода с проверкой на четность на семь сообщений

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников В.В., Кравцов Ю.А., Сапожников Вл.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: Учеб. для вузов/под ред. В.В. Сапожникова. – М.: Транспорт, 1995. 320 с.
2. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования. — М.: Машино-строение, 1985. 535 с.
3. Переборов А.С., Брылеев А.М., Сапожников В.В. и др. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: Учеб. для вузов / под ред. Переборова А.С. – М.: Транспорт, 1984. 384 с.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

Методические указания к выполнению лабораторных работ

Редактор *Е.А. Ямицкова*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

Тип. зак.	Изд. зак. 307	Тираж 300 экз.
Подписано в печать 11.09.03	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л.		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

Издательский центр РГОТУПС,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПС, 107078, Москва, Басманный пер., 6