

19/2/2

**Одобрено кафедрой
«Железнодорожная
автоматика, телемеханика
и связь»**

**Утверждено
деканом факультета
«Управление процессами
перевозок»**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

**Рабочая программа и задание на курсовую работу
с методическими указаниями
для студентов IV курса**

**специальности
190402 АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)**



Москва 2008

Разработана на основании примерной учебной программы данной дисциплины, составленной в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки инженера по специальности 190402 «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

С о с т а в и т е л и — кандидаты техн. наук, проф. Ю.Г. Боровков, доц. А.В. Орлов.

Р е ц е н з е н т — канд. техн. наук, доц. Н.В. Кондратьева (МГУПС).

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель преподавания дисциплины состоит в изложении основ теории автоматического управления, теории построения телемеханических систем управления и контроля, применяемых при автоматизации технологических процессов железнодорожного транспорта, а также в изучении принципов организации телемеханических каналов связи и теории помехозащитного кодирования информации.

Во время обучения студент должен получить теоретические знания и практические навыки по типовым элементам железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, принципам построения на их основе важнейших узлов телемеханических устройств, современным методам помехозащитного кодирования информации. Это достигается с помощью лекций, практических занятий в лабораториях с использованием современных методов и технических средств обучения, выполнения курсовой работы и самоподготовки студента, которые направлены на подготовку студентов к успешному освоению ими специальных дисциплин, связанных с изучением конкретных систем.

2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучив дисциплину, студент должен:

2.1. Знать:

- состав, назначение, характеристики и принципы действия основных элементов устройств автоматического управления и регулирования;
- состав, назначение, характеристики и принципы действия основных элементов телемеханических систем автоматизированного управления и контроля, используемых на железнодорожном транспорте;

- назначение и основные характеристики каналообразующей аппаратуры телемеханических систем;
- основы теории кодирования информации.

2.2. Уметь:

- использовать на практике формальные методы анализа и расчета звеньев и систем автоматического регулирования;
- применять на практике полученные знания для структурного синтеза конкретных устройств автоматики и телемеханики;
- производить кодирование телемеханической информации с использованием различных видов кодов.

2.3. Иметь представление:

- о теории автоматического управления, теории телемеханического управления и контроля, о методах проектирования устройств автоматики и телемеханики с учетом обеспечения безопасности движения поездов;
- о формальных методах анализа реальных узлов систем автоматического управления и регулирования;
- о современных тенденциях и перспективах развития безопасных систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики.

3. ОБЪЁМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Вид учебной работы	Всего часов	Курс IV
Общая трудоемкость дисциплины	230	
Аудиторные занятия:	32	
лекции	12	
практические занятия	4	
лабораторный практикум	16	
Курсовая работа		1
Самостоятельная работа	168	
Вид итогового контроля		Зачет, экзамен

4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

4.1. РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ ЗАНЯТИЙ

№ п/п	Наименование темы	Лекции, ч	Практические занятия, ч	Лабораторный практикум, ч
	Введение			
1	Основные понятия телемеханики	2		
2	Квантование	2		
3	Кодирование		2	2
4	Передача телемеханической информации	2		
5	Организация телемеханических каналов связи			
6	Техническая реализация узлов телемеханических систем	2		4
7	Структуры телемеханических систем			4
8	Основные понятия автоматического управления			
9	Математическое описание линейных систем автоматического управления	2	2	
10	Показатели качества автоматических систем			2
11	Устойчивость систем автоматического управления	2		2
12	Корректирующие устройства			2
13	Надежность аппаратуры телемеханических систем			

4.2. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение. Основные понятия и определения теории автоматического управления. Назначение и классификация автоматических систем. История развития устройств автоматики, телемеханики и связи, примеры их применения в промышленности, на железнодорожном транспорте и в связи. Роль автоматизации и телемеханизации в обеспечении безопасности движения поездов и повышении пропускной способности железных дорог.

Развитие отечественных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Общая характеристика систем автоматики, телемеханики и связи на перегонах и станциях, современные тенденции развития систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. [1, введение; 2, введение].

Раздел 1. Основные понятия телемеханики. Способы управления удаленными объектами. Классификация и структуры телемеханических систем. Системы телеуправления, телесигнализации, телерегулирования и телеизмерения. Телемеханические сигналы, импульсные признаки. Виды селекции. [1, гл. 2; 2, § 2.1; 4, гл. 1, 10].

Раздел 2. Квантование. Основные понятия об информации. Переносчики информации. Виды сообщений и квантование. Квантование по уровню, по времени, по уровню и времени. Дифференциальное квантование. [1, гл. 2; 2, § 2.2; 6, гл. 2].

Раздел 3. Кодирование. Классификация и характеристики кодов. Помехоустойчивость и помехозащищенность. Коды без избыточности, их построение и применение. Простой двоичный код, код Грея. Коррекция ошибок в избыточных кодах. Коды с обнаружением ошибок. Код с контролем четности, код с постоянным весом. Код с повторением, корреляционный код, код с инверсией. Код Бергера. Коды с исправлением ошибок. Код Хемминга. Систематические коды. Циклические коды. [1, гл. 2; 2, § 2.4; 4, гл. 11; 6, гл. 3].

Раздел 4. Передача телемеханической информации. Основные понятия о принципах передачи телемеханической информации. Методы модуляции телемеханических сигналов. Передача информации с повторением. Передача информации с обратной связью. Методы борьбы с помехами. [1, § 1.10; 6, гл. 4 и 5].

Раздел 5. Организация телемеханических каналов связи. Каналы связи по физическим проводным линиям связи. Уплотнение каналов связи при передаче информации по проводным линиям связи. Каналы связи по линиям электроснабжения. Модемы. Цифровые радиоканалы связи. Волоконно-оптические каналы связи. [6, гл. 6].

Раздел 6. Техническая реализация узлов телемеханических систем. Структура телемеханической системы. Линейные устрой-

ства. Реализация узлов телемеханических систем. Распределители. Программируемые распределители. Генераторы. Кодеры. Декодеры. [1, гл. 2; 2, § 2.5; 4, гл. 12].

Раздел 7. Структуры телемеханических систем. Методы синхронизации систем. Построение систем с распределительной, кодовой и кодово-распределительной селекцией. Применение микропроцессоров в телемеханике [1, гл. 2; 4, гл. 13; 6, гл. 11, 12].

Раздел 8. Основные понятия автоматического управления. Общая характеристика объектов и систем автоматического управления (САУ). Принципы автоматического управления. Структура систем автоматического управления. Классификация систем автоматического управления. Автоматические системы. Оптимальные САУ. Адаптивные системы. Понятие о нелинейных и импульсных системах, их особенности и характеристики. Измерительные элементы, управляющие органы, исполнительные устройства. Системы САУ на железнодорожном транспорте. [1, § 11.4; 4, гл. 14].

Раздел 9. Математическое описание линейных систем автоматического управления. Уравнения звеньев САУ и их линеаризация. Основные характеристики звеньев и систем. Типовые звенья САУ и их характеристики. Передаточные функции и характеристики разомкнутых систем. Структурные преобразования. Передаточные функции и характеристики замкнутой системы. [4, гл. 15].

Раздел 10. Показатели качества автоматических систем. Качество процессов управления, показатели и критерии качества САУ. Показатели качества переходного процесса. Методы построения переходных процессов. Оценка качества переходных процессов. [4, гл. 16, 18].

Раздел 11. Устойчивость систем автоматического управления. Понятие устойчивости линеаризованных систем. Алгебраические критерии устойчивости. Критерии устойчивости Гурвица и Рауса. Частотные критерии устойчивости. Анализ устойчивости систем. Критерии устойчивости Михайлова и Найквиста. Области устойчивости систем. Влияние параметров систем на их устойчивость. [4, гл. 17].

Раздел 12. Корректирующие устройства. Понятие о коррекции. Корректирующие устройства. Частотный метод синтеза корректирующих устройств. Метод пространства состояний в теории управления. [4, гл. 19].

Раздел 13. Надежность аппаратуры телемеханических систем. Методы повышения надежности. Самопроверяемый контроль кодов. Контроль кодеров и декодеров. Контроль распределителей. Общий контроль телемеханической системы. Отказы в микросистемных и микропроцессорных системах железнодорожной автоматики и телемеханики. [1, гл. 5; 2, § 5.7; 3, гл. 6—8].

4.3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

№ п/п	Название и краткое содержание работы	Часы
1	Исследование корректирующей способности кодов	2
2	Исследование схем шифраторов и дешифраторов	2
3	Исследование схем преобразователей кодов	2
4	Изучение структур телемеханики	4
5	Исследование типовых звеньев САУ	2
6	Исследование устойчивости САУ	2
7	Исследование качества и методов коррекции линейной САУ	2

4.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

№ п/п	Название и краткое содержание работы	Часы
1	Методы построения избыточных кодов	2
2	Построение ЛАЧХ простейших типовых звеньев САУ	2

5. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ТЕМЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа «Структурный синтез и исследование устройств автоматики и телемеханики».

Задание 1. Синтез и исследование автоматического регулятора скорости движущегося объекта.

Рекомендуемый план работы при выполнении задания 1:

- построение структурной схемы автоматического регулятора скорости с использованием типовых звеньев САУ;
- выбор параметров математической модели типовых звеньев;
- исследование поведения синтезированного регулятора при воздействии заданных возмущающих факторов с использованием лабораторной компьютерной программы по моделированию устройств САУ;
- оформление пояснительной записки и графического материала по результатам исследований.

Задание 2. Синтез и исследование кодера и декодера информации.

Рекомендуемый план работы при выполнении задания 2:

- построение заданного кода для передаваемого сообщения;
- расчет корректирующих способностей заданного кода;
- структурный синтез кодирующего устройства (кодера);
- определение проверочных соотношений (синдромов) для построенного кода;
- структурный синтез декодирующего устройства (декодера);
- исследование корректирующих способностей синтезированного декодера при введении заданных искажений кодовых комбинаций с использованием лабораторной компьютерной программы по моделированию дискретных устройств автоматики;
- оформление пояснительной записки и графического материала по результатам исследований, включая структурные схемы.

Примерный объем пояснительной записки составляет 16–20 с.

6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Шалягин Д. В., Цыбуля Н. А., Косенко С. С. и др. Устройства автоматики, телемеханики и связи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп.; в 2 ч. — М.: Маршрут, 2006.

2. Шалягин Д. В., Цыбуля Н. А., Боровков Ю. Г. Автоматика, телемеханика и связь: Уч. пос. Ч. 1. Автоматика и телемеханика. — М.: РГОТУПС, 2003.

3. Сапожников В. В., Кравцов Ю. А., Сапожников В. В. Теория дискретных устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 2001.

6.2. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

4. Сапожников В. В., Кравцов Ю. А., Сапожников В. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. — М.: Транспорт, 1996.

5. Шалягин Д. В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: Конспект лекций. Ч.1. Дискретные устройства. — М.: РГОТУПС, 1998.

6. Тугевич В. Н. Телемеханика: Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1985.

7. Воронов А. А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. — М.: Высшая школа, 1986.

6.3. СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Компьютерные автоматизированные обучающие системы по анализу и синтезу элементов и узлов автоматики, телемеханики и связи.

2. Рабочая программа и задание на курсовую работу с методическими указаниями для студентов IV курса. — М.: РГОТУПС, 2008.

7. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Компьютерный класс с установленным на компьютерах специализированным программным обеспечением, включая:

- программу моделирования устройств САУ;
- программу моделирования дискретных логических устройств автоматики и телемеханики.

8. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

При изучении тем, которые студенты должны проработать самостоятельно, а также при выполнении курсовой работы необходимо использовать материал, изученный в следующих дисциплинах:

1. Электроника.
2. Теоретические основы электротехники.
3. Теория дискретных устройств автоматики и телемеханики.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Для успешного выполнения курсовой работы студент должен иметь представление о составе, назначении и принципах действия основных элементов и узлов телемеханических систем автоматического управления, методах их проектирования и анализа, уметь производить кодирование телемеханической информации с использованием различных видов кодов, а также знать принципы построения кодеров и декодеров.

Прежде, чем приступать к выполнению курсовой работы, студент должен изучить соответствующие разделы основной [1; 2] литературы.

Цель курсовой работы — закрепить знания, полученные студентом при самостоятельном изучении дисциплины.

Пояснительная записка пишется либо печатается на одной стороне стандартного листа формата А4 размерами: 297×210 мм. Необходимые чертежи, не требующие распечатки, выполняются карандашом на белой бумаге аналогичного формата. Все листы записки, в том числе чертежи и таблицы, должны быть сброшюрованы и иметь сплошную нумерацию, указанную в правом верхнем углу каждого листа. Для замечаний рецензента слева оставляют поле шириной 4 см, остальные поля составляют: верхнее и нижнее — 2 см, правое — 1,5 см. Исправления по замечаниям делаются на чистой стороне предыдущего листа напротив замечаний рецензента.

Пояснительная записка должна содержать оглавление, задание и исходные данные по варианту, краткие пояснения к методике решения каждого задания с приложением необходимых чертежей и таблиц. Чертеж вставляется в пояснительную записку после той страницы, на которой имеется первая ссылка на него. Пояснения и выводы по выполненной студентом работе должны быть краткими и разборчивыми для чтения. В конце пояснительной записки следует привести список использованной литературы.

Задание 1

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА

В процессе выполнения задания 1 необходимо:

- построить структурную схему автоматического регулятора скорости с использованием типовых звеньев САУ;
- выбрать параметры математической модели типовых звеньев;
- осуществить исследование функционирования синтезированного регулятора при воздействии заданных возмущающих факторов, используя для моделирования пакет «Simulink» математической среды «Matlab system».

Для выполнения задания 1 необходимы следующие исходные данные (табл. 1):

V_n — скорость движения объекта на момент начала регулирования, км/ч;

V_3 — заданная скорость движения объекта, км/ч;

K_1 — статический коэффициент усиления первого апериодического звена, характеризующий взаимосвязь между текущим значением отклонения фактической скорости от заданной и величиной изменения регулируемой скорости в установившемся режиме;

T_1 — постоянная времени первого апериодического звена, характеризующая инерционность реализации управляющего воздействия, с;

T_2 — постоянная времени второго апериодического звена, характеризующая инерционность цепи обратной связи устройства автоматического регулирования, с;

A — амплитуда периодически изменяющегося внешнего возмущающего воздействия, км/ч;

T_b — период изменения внешнего возмущающего воздействия, с.

Вариант значений исходных данных для выполнения задания 1 выбирается студентом из табл. 1 в соответствии с последней цифрой своего шифра (правой цифрой шифра).

Закон изменения фактической скорости $V_{\phi}(t)$ движения объекта имеет вид следующей функции:

$$V_{\phi}(t) = V_n + \Delta V_b(t) + \Delta V_p(t),$$

где $\Delta V_b(t)$ – изменение фактической скорости, вызванное периодически изменяющимся внешним возмущающим воздействием с амплитудой A , км/ч;

$\Delta V_p(t)$ – изменение фактической скорости, вызванное регулирующим воздействием первого апериодического звена.

$$\Delta V_{b.\max} = \max[\Delta V_b(t)] = \begin{cases} A, & \text{при } (k-1) \cdot T_b \leq t \leq (k-0.5) \cdot T_b; \\ -A, & \text{при } (k-0.5) \cdot T_b \leq t \leq k \cdot T_b; \end{cases}$$

где $k = 1, 2, \dots, m$.

Таблица 1

Вариант	V_3	V_n	T_1	T_2	A	T_b	K_1
0	20	40	1	2	1	2π	0,001
1	25	45	0,8	0,1	1,5	$2,5\pi$	0,002
2	30	50	0,6	0,15	2	3π	0,004
3	35	55	0,5	0,2	2,5	$3,5\pi$	0,006
4	40	60	0,4	0,25	3	4π	0,008
5	45	25	0,3	0,3	1	$4,5\pi$	0,01
6	50	30	0,2	0,35	1,5	5π	0,012
7	55	35	0,1	0,4	2	$5,5\pi$	0,014
8	60	40	0,08	0,45	2,5	6π	0,016
9	65	45	0,06	0,5	3	$6,5\pi$	0,018

По результатам выполненного исследования разработанной структурной схемы регулятора скорости с использованием пакета Simulink студент должен:

- вывести на печать структурную схему и модели отдельных функциональных узлов устройства автоматического регулирования скорости;
- вывести на печать графики изменения фактической скорости объекта в процессе ее регулирования при заданных параметрах устройства;

- произвести оценку основных показателей качества регулирования скорости при изменении параметров апериодических звеньев регулятора в следующих пределах: $K_{1.\min} = 0,5 \cdot K_1$; $K_{1.\max} = 2 \cdot K_1$; $T_{2.\min} = 0,1 \cdot T_2$; $T_{2.\max} = 5 \cdot T_2$;
- привести краткое пояснение хода выполнения работы и сформулировать выводы по результатам исследований.

Задание 2

СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОДЕРА И ДЕКОДЕРА ИНФОРМАЦИИ

В процессе выполнения задания 2 необходимо:

- построить заданный код для передаваемого сообщения;
- произвести анализ корректирующих способностей заданного кода;
- произвести структурный синтез кодирующего устройства (кодера);
- произвести структурный синтез декодирующего устройства (декодера);
- осуществить исследование корректирующих способностей синтезированного декодера при введении заданных искажений кодовых комбинаций, используя для моделирования пакет «Simulink» математической среды «Matlab system».

Исходные данные для выполнения задания 2:

- для передачи сообщений в кодовых комбинациях используются четыре информационных разряда, количество которых позволяет передать $2^4 = 16$ возможных сообщений;
- передаваемое сообщение, которое следует закодировать, представляет собой двоичное четырехразрядное число, полученное преобразованием в двоичный код суммы предпоследней цифры шифра студента и числа шесть;
- используемый для кодирования сообщения избыточный код выбирается по сумме двух последних цифр шифра студента из табл. 2;

Таблица 2

Вариант	Сумма чисел шифра	Избыточный код
1	Простое число (не разлагаемое на сомножители нечетное число)	Модифицированный код Бауэра
2	Разлагаемое на сомножители нечетное число	Инверсный код
3	Четное число, причем обе последние цифры шифра есть нечетные числа	Код Хемминга (семи-разрядный)
4	Четное число, причем обе последние цифры шифра есть четные числа	Модифицированный код Хемминга

- при исследовании корректирующих способностей избыточного кода следует на входе декодера сформировать следующие типы искажений кодовой комбинации:
 - одиночная ошибка в информационных разрядах;
 - одиночная ошибка в контрольных разрядах;
 - двойная ошибка в информационных разрядах;
 - двойная ошибка в контрольных разрядах;
 - одиночная ошибка в информационных разрядах одновременно с одиночной ошибкой в контрольных разрядах;
 - тройная ошибка в кодовой комбинации.

Примечание: выбор искажаемых разрядов для получения каждого из типов искажений кодовой комбинации осуществляется студентом по своему усмотрению.

По результатам исследования декодирующего устройства с использованием пакета «Simulink» студент должен:

- привести краткие пояснения по синтезу структурных схем кодера и декодера;
- изобразить синтезированные структурные схемы кодера и декодера;
- оформить в виде таблицы результаты исследования корректирующих способностей заданного вариантом кода;
- сформулировать краткие выводы по результатам исследования.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Системой автоматического регулирования (САР) называется такая система, которая в течение достаточно длительного времени автоматически поддерживает требуемое неизменное значение некоторой физической величины (например, скорости линейного или углового перемещения объекта) в каком-либо процессе или изменяет это значение по заданной программе. САР, работающие на поддержание постоянного значения регулируемой величины, называют также системами стабилизации (например, стабилизаторы напряжения или тока).

Объект, параметры которого подлежат автоматической регулировке, называется объектом регулирования (ОР). В нашем случае, в качестве движущегося объекта регулирования может быть поезд, отдельный локомотив или любая другая подвижная единица.

Параметр, значение которого требуется регулировать, называется регулируемой величиной. В соответствии с заданием регулируемой величиной является фактическая скорость движения подвижной единицы.

Устройство, осуществляющее непосредственное регулирующее воздействие на объект регулирования, называют автоматическим регулятором, или просто регулятором. В нашем случае — регулятором скорости. Регулятор, как правило, содержит следующие основные узлы:

- измерительное устройство, чувствительный элемент которого реагирует на фактическое значение регулируемой величины;
- усилительно-преобразовательное устройство, преобразующее (как правило, по линейному закону) входную физическую величину одной природы в физическую величину другой природы (например, преобразует малую физическую величину электрической природы в большое механическое воздействие), используемую при формировании

управляющего воздействия на исполнительное устройство;

- исполнительное устройство, предназначенное для оказания непосредственного регулирующего воздействия на объект регулирования.

Таким образом, САР есть совокупность автоматического регулятора и регулируемого объекта, и представляет собой замкнутую систему, в которой передача воздействий от одного ее звена к другому (внутренние воздействия) осуществляется по замкнутому контуру.

На САР могут поступать внешние воздействия, основным из которых является задающее воздействие, характеризующее требуемый (эталонный) характер протекания процесса. Оно поступает от внешнего задающего устройства. В нашем случае задающим воздействием является заданное значение линейной скорости перемещения подвижной единицы.

Совокупность задающего устройства и САР образует систему автоматического управления САУ, которая в общем виде может иметь несколько различных объектов регулирования (например, система автоматического управления движением поездов на некотором участке пути САУ ДП).

К внешним воздействиям на САР относятся также возмущающие воздействия на объект регулирования (например, изменение сопротивления движению движущегося поезда на участках пути с различным профилем).

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ САУ

В качестве ОР будем подразумевать колесное транспортное средство, линейное поступательное движение которого осуществляется за счет вращательного движения колесных пар. Следовательно, чувствительным элементом изменения скорости движения объекта может служить колесо, а в качестве измерительного устройства может служить, например, преобразователь скорости вращения колеса в напряжение постоянного тока или частоту переменного тока.

Введем следующие обозначения:

$K_{\text{л}}$ – коэффициент преобразования, связывающий линейную скорость $V_{\text{ф}}(t)$ с угловой скоростью $\omega(t)$ вращения колеса: $\omega(t) = K_{\text{л}} \cdot V_{\text{ф}}(t)$;

$K_{\text{в}}$ – коэффициент преобразования угловой скорости вращения колеса в напряжение постоянного тока: $U_{\text{ф}}(t) = K_{\text{в}} \cdot \omega(t) = K_{\text{л}} \cdot K_{\text{в}} \cdot V_{\text{ф}}(t)$;

$K_{\text{у}}$ – коэффициент преобразования линейной скорости в напряжение постоянного тока: $U_{\text{ф}}(t) = K_{\text{у}} \cdot V_{\text{ф}}(t)$, где $K_{\text{у}} = K_{\text{л}} \cdot K_{\text{в}}$.

В качестве усилительно-преобразовательного устройства может служить электросиловая установка, находящаяся на транспортном средстве и воздействующая на тяговый двигатель, являющийся исполнительным устройством, выполняющим функции ускорения или замедления (при электрическом реостатном торможении) вращения колеса. Коэффициент преобразования $K_{\text{уп}}$ усилительно-преобразовательного устройства устанавливает связь между величиной отклонения $\Delta U = U_3 - U_{\text{ф}} = K_{\text{у}} \cdot (V_3 - V_{\text{ф}})$ задающего воздействия U_3 от измеренного значения $U_{\text{ф}}$ и величиной требуемой силы тяги $F_{\text{Т}}$ (или силой торможения $W_{\text{Т}}$), а именно: $F_{\text{Т}} = K_{\text{уп}} \cdot \Delta U$. Тяговый двигатель в режиме тяги реализует требуемое значение силы $F_{\text{Т}}$ или в режиме генератора – требуемое значение силы $W_{\text{Т}}$, обеспечивая соответствующее изменение скорости вращения колеса в единицу времени (ускорение/замедление b).

С целью упрощения структурной схемы регулятора скорости принимаем допущение о равенстве абсолютного значения приращения скорости в единицу времени b как при регулируемом увеличении скорости вращения колеса, так и при ее снижении в процессе торможения транспортного средства. Очевидно, что приращению угловой скорости вращения колеса b в единицу времени соответствует приращение линейной скорости $a = b / K_{\text{л}}$.

Для повышения точности регулирования скорости движения ОР на практике часто вводят такую зависимость между

величиной отклонения ΔV значений заданной скорости V_3 от фактической V_ϕ и величиной b , при которой, чем меньше величина отклонения, тем меньше значение b . В качестве примера примем линейную зависимость: $b(\Delta V) = K \cdot (V_3 - V_\phi)$, где K – коэффициент пропорциональности. Следовательно, если известна разность ΔV , то можно определить общий коэффициент преобразования (усиления) K_1 тракта, состоящего из усилительно-преобразовательного и исполнительного устройств, из следующего соотношения:

$$K \cdot (V_3 - V_\phi) = u(\Delta V) = a \cdot K_n, \text{ откуда}$$

$$a = K \cdot \frac{U_3 - U_\phi}{K_u \cdot K_n} = K_1 \cdot (V_3 - V_\phi),$$

где $K_1 = \frac{K}{K_u \cdot K_n}$.

Значения коэффициента K_1 для различных вариантов приведены в табл. 1, а на рис. 1 приведена общая структурная схема регулятора скорости, состоящая из набора связанных между собой функциональных узлов (блоков).

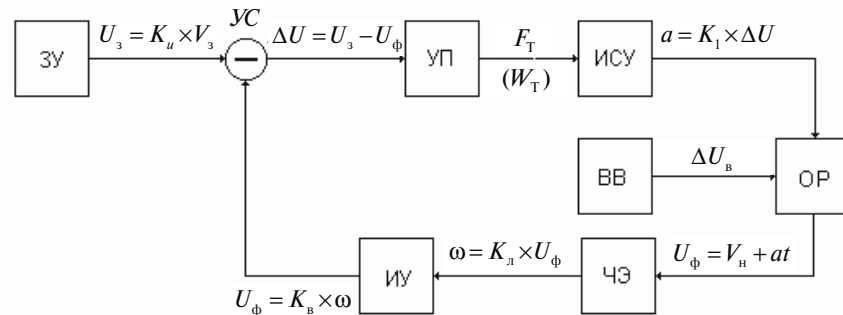


Рис. 1. Общая структурная схема регулятора скорости

С выхода задающего устройства ЗУ на один из входов устройства сравнения УС поступает постоянное напряжение U_3 , пропорциональное значению заданной скорости V_3 . На другой вход устройства УС поступает напряжение U_ϕ , пропорциональ-

ное фактической скорости движения V_ϕ . С выхода УС сигнал ошибки в виде напряжения ΔU , пропорционального разности скоростей $(V_3 - V_\phi)$, поступает на собственно регулятор, состоящий из усилительно-преобразовательного УП и исполнительного ИСУ устройств и который преобразует сигнал ошибки ΔU в регулирующее воздействие на объект ОР, ускоряя или замедляя его движение с интенсивностью a в зависимости от величины и знака рассогласования скоростей. Система автоматического регулирования, представленная на рис. 1, относится к статическим системам автоматического регулирования, в которых регулирование осуществляется по отклонению. Для статических систем характерна существенная зависимость ошибки регулирования в установившемся режиме от значения статического коэффициента усиления K_1 разомкнутой (без обратной связи) системы регулирования. С увеличением K_1 ошибка $\Delta V = V_3 - V_\phi$ уменьшается, а с уменьшением – увеличивается.

Прежде, чем приступить к анализу процесса регулирования и к выбору структуры и параметров САУ, ее предварительно разбивают на элементарные типовые динамические звенья. При этом определяют статические и динамические характеристики каждого звена. Как видно из рис. 1, каждый функциональный блок имеет свою входную и выходную величину. Так как коэффициент преобразования K_u изменяет только масштаб переменных, то в дальнейшем удобнее оперировать с входными и выходными переменными в масштабе скорости. Тогда статическая характеристика ОР будет выражать собой зависимость между выходной (регулируемой) величиной V_ϕ и входной величиной (регулирующим воздействием) $\Delta V_p = a \cdot t$ и иметь вид:

$$V_\phi = V_n + \Delta V_p,$$

где V_n – скорость объекта на момент начала регулирования, a – требуемое изменение линейной скорости в единицу времени с тем, чтобы обеспечить соответствующее приращение скорости ΔV_p в установившемся режиме регулирования.

Кроме того, на ОР может поступать внешнее периодически изменяющееся возмущающее воздействие, обусловленное, например, изменением сопротивления движению транспортного средства на участках пути с различным профилем, вызывающее изменение фактической скорости на величину, равную ΔV_B . Следовательно, статическая характеристика ОР окончательно примет следующий вид: $V_\phi = V_n + \Delta V_p + \Delta V_B$.

На рис. 2. показана структурная схема модели ОР, представленная в виде блока генератора ступенчатой функции, генерирующего постоянный сигнал F , численно равный начальной скорости движущегося объекта V_n , и двух блоков, реализующих функцию суммирования всех воздействий.

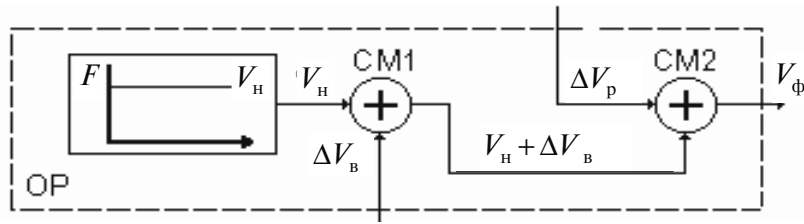


Рис. 2. Структурная схема модели объекта регулирования (ОР)

Прежде, чем приступать к моделированию процесса регулирования скорости, необходимо разработать структурные схемы моделей отдельных функциональных узлов, входящих в состав устройства автоматического регулирования с использованием элементарных типовых динамических звеньев.

Для упрощения моделирования случайное по своей природе возмущающее воздействие на процесс движения ОР, заменим периодическим, постоянной формы и амплитуды. В этом случае структурная схема модели источника ВВ может быть представлена в виде блока, состоящего из двух последовательно включенных звеньев (рис. 3):

- генератора прямоугольных импульсов в виде меандра с амплитудой сигнала, равной ± 1 , предназначенного для задания периода T_B изменения ВВ;
- аperiodического звена первого порядка, предназначенного для задания формы и амплитуды ВВ.

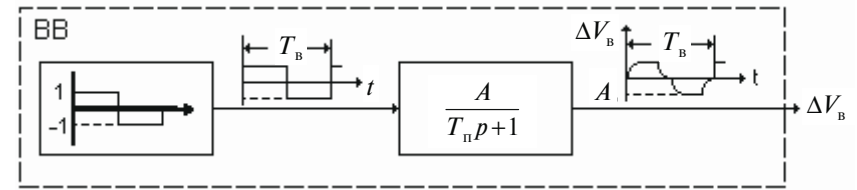


Рис. 3. Структурная схема модели блока возмущающих воздействий (ВВ)

Передаточная функция данного аperiodического звена, заданная в операторной форме, имеет вид: $W(p) = \frac{A}{T_n \cdot p + 1}$.

Переходная характеристика этого динамического звена представляет собой экспоненциальную функцию следующего вида:

$$\Delta V_B(t) = h(t) = A \cdot \left(1 - e^{-t/T_n}\right),$$

где T_n – постоянная времени аperiodического звена характеризует скорость изменения возмущающего воздействия;

A – коэффициент усиления звена, задающий максимально возможное отклонение ΔV_B фактической скорости под воздействием внешних факторов.

Значение коэффициента A выбирается из табл.1, а значение постоянной времени T_n выбирается студентом произвольно, но при этом оно не должно превышать $T_B/10$ ($T_n \leq 0,1 \cdot T_B$).

Два последовательно включенных функциональных блока в цепи обратной связи: чувствительный элемент (ЧЭ) и измерительное устройство (ИУ) можно было бы представить в виде усиленного безинерционного звена с коэффициентом усиления K_2 , который по своей сути является коэффициентом усиления K_{oc} цепи обратной связи между выходом и входом регулятора скорости.

Так как регулируемый объект обладает инерционностью, т.е. для регулируемого изменения скорости требуется определен-

ное время, то для ее учета в цепь обратной связи дополнительно вводим апериодическое (инерционное) звено с постоянной времени T_2 и коэффициентом усиления $K = 1$. Структурная схема блока, замещающего элементы цепи обратной связи, представлена на рис. 4.

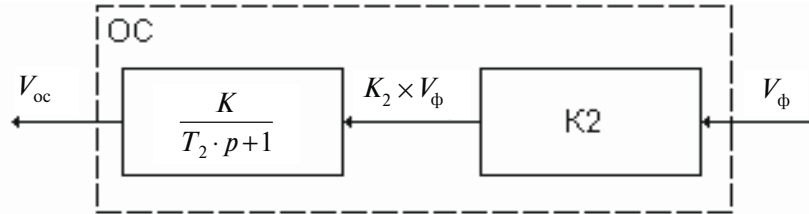


Рис. 4. Структурная схема модели цепи обратной связи (ОС)

Взаимосвязь между входным и выходным сигналами модели цепи обратной связи в этом случае описывается соотношением:

$$V_{oc} = V_{\phi} \cdot \frac{K_2}{T_2 \cdot p + 1}.$$

Значение постоянной времени T_2 выбирается из табл.1, а значение коэффициента усиления K_2 при моделировании регулятора скорости должно определяться автоматическим расчетом из уравнения динамики регулятора, методика составления которого приводится ниже.

Два последовательных функциональных блока в основной цепи регулятора: усилительно-преобразовательное (УП) и исполнительное (ИСУ) устройства представим в виде одного апериодического звена с коэффициентом усиления K_1 , характеризующим результирующий коэффициент усиления данной цепи, и постоянной времени T_1 , которая характеризует инерционность исполнительного устройства. Значения переменных K_1 и T_1 выбираются из табл.1.

Задающее устройство (ЗУ) может быть представлено в виде формирователя сигнала постоянного уровня F , численно равного значению заданной скорости V_3 . Сигнал с выхода ЗУ поступает на один из входов устройства сравнения (УС), реализующего функцию вычитания (сравнения) двух сигналов. На

другой вход УС должен поступать сигнал V_{oc} с выхода блока ОС, моделирующего цепь обратной связи.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

На рис. 5 представлена структурная схема системы автоматического регулирования скорости движущегося объекта для установившегося режима ($p = 0$) при разомкнутой цепи обратной связи. Она позволяет уточнить неизвестные параметры вновь вводимых звеньев. Это позволит синтезировать математическую модель САР скорости в окончательном виде.

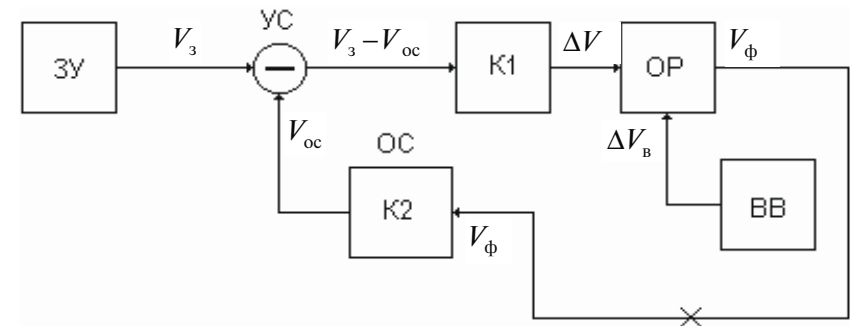


Рис. 5. Структурная схема САР скорости для установившегося режима

Составим математическую модель регулятора скорости для установившегося режима, используя структуру регулятора, представленную на рис. 5, для чего разомкнем условно цепь обратной связи (на рисунке отмечено крестиком). Тогда для скорости V_{ϕ} на выходе блока ОР будет справедливо по определению следующее уравнение: $V_{\phi} = V_n + \Delta V_p + \Delta V_b$.

Из схемы на рис. 5 следует, что сигнал ΔV_p на входе блока ОР равен: $\Delta V_p = K_1 \cdot (V_3 - V_{oc})$, где $V_{oc} = K_2 \cdot V_{\phi}$. Подставляя выражение для V_{oc} в формулу для ΔV_p , получим:

$$\Delta V_p = K_1 \cdot (V_3 - K_2 \cdot V_{\phi}).$$

В результате выражение для V_ϕ примет окончательный вид: $V_\phi = V_n + \Delta V_B + K_1 \cdot (V_3 - K_2 \cdot V_\phi)$. Последнее уравнение является математической моделью рассмотренного выше регулятора скорости и позволяет определить неизвестный параметр K_2 . После несложного преобразования данное уравнение можно привести к следующему виду: $V_\phi = \frac{K_1 \cdot V_3 + V_n + \Delta V_B}{1 + K_1 \cdot K_2}$.

Решим полученное уравнение относительно переменной K_2 . Очевидно, исходя из назначения самого регулятора, что в установившемся режиме должно выполняться равенство: $V_\phi = V_3$, т.е.:

$$V_3 = \frac{K_1 \cdot V_3 + V_n + \Delta V_B}{1 + K_1 \cdot K_2}, \text{ откуда } K_2 = 1 + \frac{V_n + \Delta V_B - 1}{K_1}.$$

Из приведенного выражения следует, что в схему регулятора требуется ввести дополнительные звенья, которые бы обеспечивали автоматическую перестройку статического коэффициента усиления цепи обратной связи K_2 в зависимости от значений заданной и начальной скоростей, статического коэффициента усиления K_1 , а также текущего значения ВВ ΔV_B . Входящие в формулу величины V_n, V_3, K_1 являются константами, тогда как величина ВВ является функцией времени $\Delta V_B(t)$. Вследствие этого, и значение K_2 также изменяется во времени. На рис.6 представлена соответствующая структурная схема блока автоматической настройки статического коэффициента усиления цепи обратной связи K_2 (блока усиления K_2), содержащего следующие звенья:

- два делителя Д1 и Д2, реализующие функции деления двух сигналов;
- блок УС, реализующий функцию вычитания сигналов;
- блок СМ, реализующий функцию суммирования двух сигналов;
- блок генератора ступенчатой функции $F = 1$;
- блок генератора ступенчатой функции $F = K_1$.

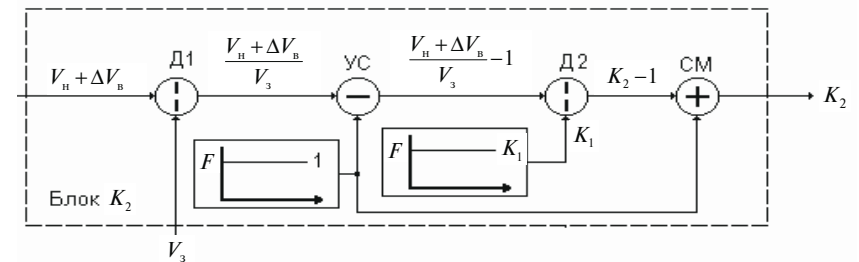


Рис. 6. Структурная схема блока автоматической настройки коэффициента усиления K_2 цепи обратной связи

Как видно из схемы на рис. 6, делитель Д1 реализует операцию: $\frac{V_n + \Delta V_B}{V_3}$; блок УС – операцию: $\frac{V_n + \Delta V_B - 1}{V_3}$; делитель

Д2 – операцию: $\left(\frac{V_n + \Delta V_B - 1}{V_3} \right) / K_1 = K_2 - 1$; блок СМ – опера-

цию: $(K_2 - 1) + 1 = K_2$.

Таким образом, состав и параметры звеньев структурной схемы модели автоматического регулятора скорости нами определены полностью, в том числе входные и выходные сигналы каждого звена.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗИРОВАННОГО РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ

Соединив между собой модели функциональных узлов, приведенных на рисунках 2–6, можно составить модель системы автоматического регулирования скорости движущегося объекта. Для моделирования работы синтезированной САР рекомендуется использовать пакет «Simulink», входящий в «Matlab system», поэтому приведенные ниже рекомендации изложены в приложении к пакету «Simulink».

Ознакомление с основами работы при построении и исследовании моделей динамических систем в пакете «Simulink»


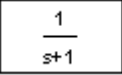




осуществляется в процессе выполнения практических и лабораторных работ, а также на основе рекомендаций, изложенных в предоставляемом студентам «Кратком руководстве по работе в пакете «Simulink» среды «MATLAB System»».

При выполнении исследовательской части задания рекомендуется следующая последовательность этапов:

1. Настройка параметров моделирования. Основным параметром, который требует настройки перед началом моделирования, является длительность моделирования, выраженная в секундах. Длительность моделирования представляет собой положительное число, которое задается в соответствующей строке заголовка панели инструментов и должна быть равно не менее 2–3 периодов T_b . По умолчанию значение времени окончания моделирования равно 10 сек.

2. Построение, настройка и проверка работоспособности моделей отдельных функциональных блоков САР. Основные типовые блоки «Simulink» используемые при выполнении задания приведены в табл. 3.

Таблица 3

№ п/п	Обозначение блока	Название блока
1	 Repeating Sequence Stair	Генератор произвольной ступенчатой функции
2	 Transfer Fcn	Элемент, реализующий заданную пользователем передаточную функцию
3	 Scope	Элемент отображения значения сигнала во времени (осциллограф)
4	 Sum	Многоходовый элемент, реализующий функции сложения и вычитания сигналов
5	 Constant	Формирователь сигнала постоянного уровня
6	 Product	Многоходовый элемент, реализующий операции умножения и деления сигналов

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ВОЗМУЩАЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Модель блока возмущающих воздействий (см. рис. 3) содержит последовательно соединенные:

- генератор двухполярных прямоугольных импульсов амплитудой $A_r = 1$ с периодом T_b , в качестве которого импульсов следует использовать элемент №1 табл. 3.

- апериодическое звено первого порядка, передаточная характеристика которого имеет вид: $W(p) = \frac{k}{T_n \cdot p + 1}$, а переходная

характеристика соответственно равна: $\Delta V_b(t) = k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_n}}\right)$, где

параметр k определяется в соответствии с вариантом студента из табл. 1 методических указаний, как $k = A$, а T_n подбирается студентом самостоятельно с учетом ограничения: $T_n \leq 0,1 \cdot T_b$. Данное апериодическое звено следует задать при помощи элемента №2 табл. 3.

Примечание: в пакете «Simulink» для обозначения оператора Лапласа вместо символа p используется символ s .

В процессе настройки параметров генератора необходимо задать:

- в строке «Vector of output values» – последовательность уровней выходного сигнала элемента в виде: $[1 \ -1]^T$.

- в строке «Sample time» – продолжительность каждого из уровней сигнала, равную половине периода T_b .

Примечание: подробно процесс настройки параметров элементов описан в соответствующем разделе краткого руководства по работе в «Simulink MATLAB System».

Для настройки параметров апериодического звена необходимо задать:

- в строке «Numerator»: – численное значение параметра k в виде $[A]$;

– в строке «Denominator»: – численные значения коэффициентов знаменателя передаточной функции звена: постоянной времени T_n и 1 в виде $[T_n \ 1]$.

После задания значений параметров элементов и изображения связей должны получить модель блока ВВ в виде, аналогичном представленному на рис. 7.

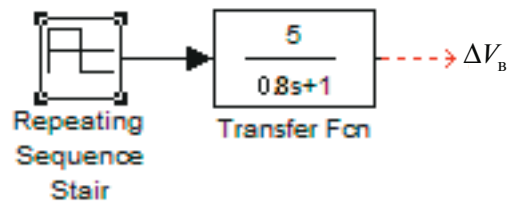


Рис. 7. Программная модель блока возмущающих воздействий

Для проверки работоспособности модели блока ВВ следует воспользоваться осциллографом (элементом № 3 из табл. 3), который следует временно подключить к выходу ΔV_b блока. Далее следует запустить моделирование, а по его окончании

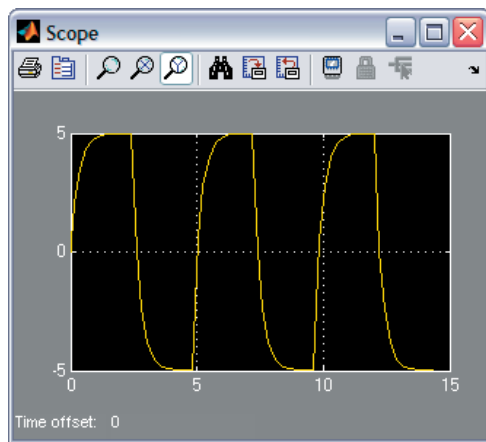


Рис. 8. Выходной сигнал блока возмущающих воздействий

открыть окно дисплея осциллографа, чтобы посмотреть график результатов моделирования. При правильной настройке блока ВВ форма его выходного сигнала должна быть похожа на форму сигнала, представленного на рис. 8, а амплитуда и период соответствовать варианту задания.

После того, как выходной сигнал блока ВВ проверен на соответствие введенным параметрам по амплитуде,

форме и периоду, элемент Scope можно удалить, а синтезированную модель блока сохранить (см. соответствующие разделы краткого руководства).

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Выше показано, что фактическая скорость ОР (локомотива) V_ϕ складывается из начальной его скорости V_n , приращения скорости вследствие управляющих воздействий регулятора ΔV_p и приращения скорости из-за влияния возмущающих воздействий ΔV_b (см. рис. 2), поэтому статическая характеристика ОР имеет вид:

$$V_\phi = V_n + \Delta V_b + \Delta V_p.$$

Для моделирования ОР можно воспользоваться элементом №4 из табл. 3, для которого можно в настройках задать требуемые функции и количество входов. Вместе с тем, модель блока обратной связи с автоматически регулируемым коэффициентом усиления K_2 (см. рис. 6) также содержит сумму $(V_n + \Delta V_b)$, поэтому целесообразно структурную схему объекта регулирования реализовать таким образом, чтобы в последующем можно было использовать сигнал $(V_n + \Delta V_b)$ также и при моделировании блока усиления K_2 . Следовательно, вместо одного элемента №4 табл. 3 необходимо использовать два аналогичных двухвходовых: $V_\phi = (V_n + \Delta V_b) + \Delta V$.

Начальная скорость V_n является константой и представляет собой текущую скорость движения локомотива на момент выдачи регулятору очередного задания по скорости, поэтому в качестве формирователя сигнала начальной скорости можно использовать формирователь сигнала постоянного уровня (элемент №5 табл. 3).

Синтезированная модель объекта регулирования представлена на рис. 9.

В качестве примера начальная скорость принята равной $V_n = 0$ км/ч. Данное значение было записано в строку «Constant

value» окна настройки параметров формирователя сигнала постоянного уровня (элемент №5 табл. 3).

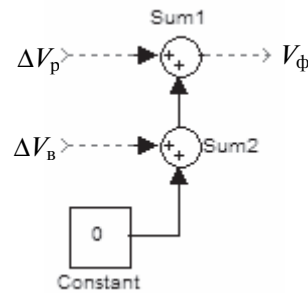


Рис. 9. Модель объекта регулирования

На соответствующий вход модели объекта регулирования уже можно подключать выходной сигнал $\Delta V_в$ блока возмущающих воздействий.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНЕРЦИИ ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Смоделировать инерцию цепи обратной связи позволяет апериодическое звено первого порядка, которое также называют инерционным звеном первого порядка (см. рис. 4), для чего передаточную функцию цепи обратной связи представим в виде произведения передаточных функций двух последовательно включенных типовых звеньев: усилительного безынерционного звена $W(p) = K_2$ и апериодического звена со статическим коэффициентом усиления, равным 1, и постоянной времени T_2 :

$$W_{oc}(p) = \frac{K_2}{T_2 \cdot p + 1} = K_2 \cdot \frac{1}{T_2 \cdot p + 1}.$$

Здесь апериодическое звено характеризует только инерционность цепи обратной связи, задаваемую постоянной времени T_2 . Например, при $T_2 = 0,09$ с модель инерции цепи обратной связи имеет вид, представленный на рис. 10. Поскольку в

цепи обратной связи сигнал направлен от выхода блока ОР к входу устройства сравнения САР, то для удобства последующих соединений блок инерции целесообразно предварительно развернуть на 180° .

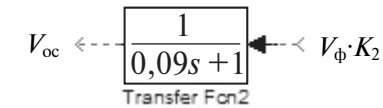


Рис. 10. Модель инерции цепи обратной связи

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Блок регулирования замещает собой последовательно включенные усилительно-преобразовательное звено и исполнительное устройства (см. рис. 1) и может быть представлен в модели в виде апериодического звена со статическим коэффициентом усиления K_1 и постоянной времени T_1 . При заданных в качестве примера значениях: $K_1 = 0,7$ и $T_1 = 0,08$ с модель блока регулирования, реализующего передаточную функцию $W_1(p) = K_1 / (T_1 \cdot p + 1)$, примет вид, представленный на рис. 11.

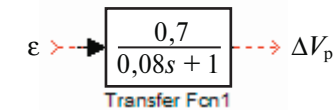


Рис. 11. Модель блока регулирования

Выходной сигнал данного блока ΔV_p следует подключить к соответствующему входу блока объекта регулирования. На вход блока поступает управляющий сигнал ϵ с выхода элемента сравнения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ

Блок управления представляет собой задатчик скорости ЗУ, вырабатывающий требуемое значение скорости движения ло-

комотива $-V_3$, и устройство сравнения УС, сравнивающее сигнал задатчика с сигналом обратной связи V_{oc} (см. рис. 1).

Так как $V_3 = \text{const}$, то в качестве модели задатчика удобно использовать элемент № 5 табл. 3, в строке «Constant value» окна настройки которого необходимо указать заданную по варианту скорость.

Отрицательная обратная связь САР замыкается при помощи узла сравнения, который формирует управляющий сигнал, представляющий собой сигнал разности (рассогласования) ε между выходным сигналом V_3 задатчика и сигналом, формируемым цепью обратной связи V_{oc} : $\varepsilon = V_3 - V_{oc}$.

Узел сравнения легко реализовать на элементе №4 табл. 3, изменив его настройки таким образом, чтобы сигнал V_{oc} поступал на вычитающий вход (со знаком «-»). Синтезированная часть САР, содержащая задатчик и узел сравнения, приведена на рис. 12. В качестве примера задана скорость 30 км/ч.

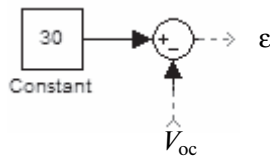


Рис. 12. Модель блока управления

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА УСИЛИТЕЛЯ С АВТОМАТИЧЕСКИ РЕГУЛИРУЕМЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ

В разделе «Выбор параметров математической модели типовых звеньев» была получена передаточная функция усилительного звена с автоматически регулируемым коэффициентом усиления K_2 в виде:

$$K_2 = 1 + \frac{V_H + \Delta V_B - 1}{K_1 V_3} \quad (1)$$

При синтезе модели данного звена следует учесть, что сигнал $(V_H + \Delta V_B)$ уже смоделирован в блоке объекта регулирования, а сигнал V_3 – в задатчике скорости ЗУ. Так как в блоке регулирования выход сигнала K_1 , моделирующего значение статического коэффициента усиления блока, не предусмотрено, то его необходимо сформировать, используя для этих целей дополнительный элемент №5 табл.3. Элемент этого же типа можно использовать также для формирования константы «1».

Арифметические операции: «+», «-» легко реализуются при помощи соответствующим образом настроенного элемента №4 табл. 3, а операции: (\cdot) , $(:)$ – при помощи элемента №6 табл. 3. Необходимые сведения о настройках параметров перечисленных элементов приведены в кратком руководстве по работе в Simulink MATLAB System.

Примерная модель блока усилителя цепи обратной связи, соответствующая формуле (1) при значении коэффициента $K_1 = 0,7$, приведена на рис. 13.

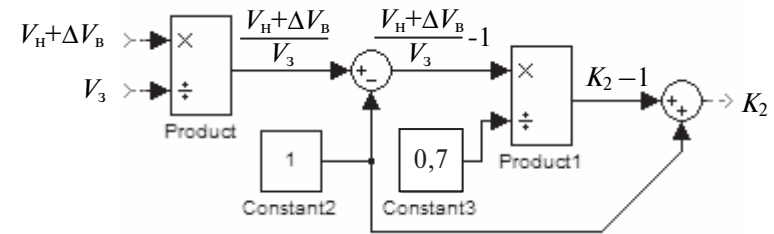


Рис. 13. Модель блока усилителя цепи обратной связи

Вход модели «×» необходимо подключить к сигналу $(V_H + \Delta V_B)$ модели ОР, а вход «÷» – к выходному сигналу V_3 задатчика скорости.

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЛОКА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Блок обратной связи представляет собой последовательное соединение блоков инерции и усилителя цепи обратной связи (см. рис. 4). Однако, как видно из рис. 13 в блоке усили-

теля цепи обратной связи отсутствует вход для ввода сигнала о фактической скорости локомотива V_{ϕ} . Следовательно, чтобы обеспечить ввод сигнала V_{ϕ} в блок обратной связи, необходимо включить в его состав двухвходовой умножитель сигналов, входы которого подключены к выходам блоков, формирующих сигналы K_2 и V_{ϕ} , а выход — к входу блока инерции цепи обратной связи так, как показано на рис. 14.

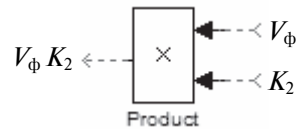


Рис. 14

Соединение блоков модели САР

После выполнения всех необходимых соединений между модулями отдельных функциональных блоков, представленных на рис. 7, 9–14, искомая система автоматического регулирования скорости локомотива будет синтезирована полностью. Для проверки работоспособности и последующего исследования полученной модели САР скорости локомотива необходимо регулируемый параметр V_{ϕ} подключить к индикатору, в качестве которого следует использовать осциллограф (элемент № 3 табл. 3).

Для упрощения ориентирования в конечной модели САР рекомендуется элементы каждого функционального блока регулятора окрашивать в один уникальный цвет, после чего следует сохранить синтезированную модель на диске ПЭВМ. Кроме того, синтезированную модель следует распечатать на листе бумаги, который затем вставить в пояснительную записку.

Исследование модели синтезированной САР скорости локомотива

Исследование модели САР скорости движущегося объекта (локомотива) представляет собой последовательность обязательных этапов:

- 1) периодическое задание новых значений переменных параметров модели, влияние которых на результаты функционирования САР требуется проанализировать студенту;
- 2) моделирование;
- 3) регистрация результатов;
- 4) анализ результатов и выводы.

Задание значений параметров модели

Целью исследования модели регулятора является получение количественной оценки качества регулирования скорости локомотива при вариации значений постоянных времени T_2 и статического коэффициента усиления K_1 соответствующих апериодических звеньев, входящих в модель регулятора.

Как следует из задания к курсовой работе, каждый из параметров K_1 и T_2 может принимать три значения: среднее, минимальное и максимальное. Следовательно, количество возможных вариаций параметров составляет: $3^2 = 9$. С целью упрощения исследования студентам рекомендуется выполнить только пять испытаний, со следующими значениями параметров:

- 1) K_1, T_2 ; 2) $K_{1.min}, T_2$; 3) $K_{1.max}, T_2$; 4) K_1, T_{2min} ; 5) K_1, T_{2max} .

При синтезе модели в качестве параметров апериодических звеньев, входящих в регулятор были заданы средние значения параметров (K_1, K_2, T_1 и T_2), поэтому при выполнении первого испытания можно сразу приступить к моделированию.

Моделирование

Для запуска моделирования нажать кнопку «Start» в панели инструментов. Если регулятор синтезирован без ошибок, то остановка моделирования произойдет автоматически, в противном случае следует вручную остановить моделирование кнопкой «Stop» и проверить корректность синтезированной схемы.

Регистрация результатов

Двойным щелчком левой кнопки мыши на изображении осциллографа (элемент «Score») модели отобразить график

результатов моделирования, затем включить автомасштабирование графика, сделать копию для последующей распечатки и вставки в отчет (см. раздел. «Вставка результатов моделирования в отчет» краткого руководства).

В отчете следует оформить вставленную копию графика: подписать названия осей и единиц измерения величин, подписать названия графиков функций и самого графика, указать значения параметров K_1 и T_2 , при которых получен данный график процесса регулирования скорости.

Анализ результатов и выводы

Целью работы САР скорости локомотива является обеспечение его фактической скорости движения равной заданной. К количественным критериям оценки качества регулирования САР относятся:

- максимальное абсолютное отклонение регулируемой скорости, км/ч,

$$\Delta V_{\phi} = V_{\phi} - V_3;$$

- максимальное относительное отклонение регулируемой скорости, %,

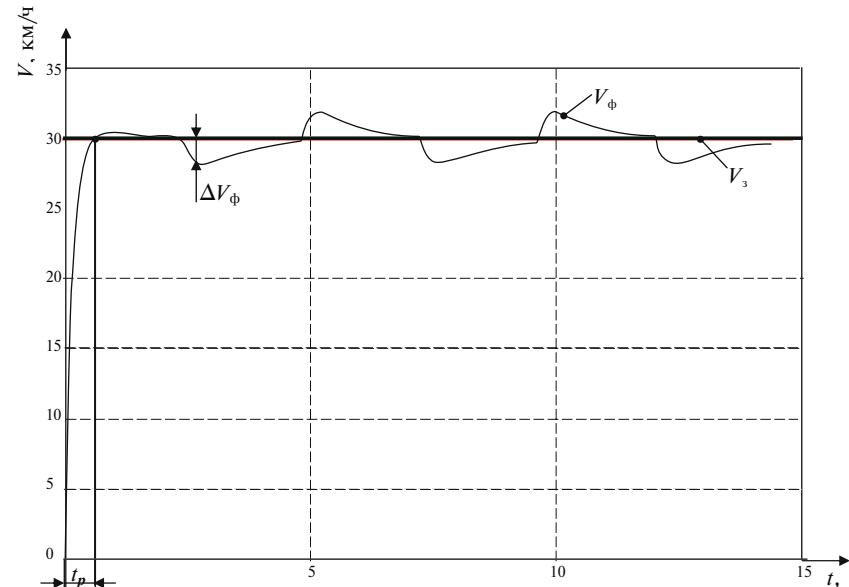
$$\delta V_{\phi} = \frac{\Delta V_{\phi}}{V_3} \cdot 100\%,$$

- время регулирования скорости t_p , с.

Для вычисления показателей качества регулирования САР по указанным критериям необходимо сначала на полученных графиках зависимости фактической скорости локомотива от времени дополнительно изобразить параллельно оси времени линию заданной скорости локомотива, затем с учетом масштаба величин, отложенных по каждой из координатных осей, вычислить значения соответствующих показателей.

Пример оформления результатов одного испытания САР скорости локомотива представлен на рис. 15.

Выводы по результатам выполненного задания должны отвечать на вопрос: как влияют параметры K_1 и T_2 регулятора на точность регулирования скорости? Выводы должны быть подкреплены ссылками на соответствующие графики.



1) значения параметров: $K_1 = 0,7$, $T_2 = 0,09$ с.

2) показатели качества регулирования САР:

$$t_p = 0,7 \text{ с}; \Delta V_{\phi} = \pm 1,7 \text{ км/ч}; \delta V_{\phi} = \pm \frac{1,7}{30} \cdot 100\% \approx \pm 5,7\%$$

Рис. 15. График зависимости фактической скорости движения локомотива от времени

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЗАДАНИЮ 2

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Процесс преобразования сообщения для передачи по каналу связи средствами телемеханики, называется кодированием. Процесс обратного преобразования сигнала на приемной стороне в сообщение называется декодированием. Каждому сообщению до преобразования его в соответствующую кодовую комбинацию в устройстве телемеханики соответствует определенное двоичное число, состоящее из k разрядов (исходный

двоичный код) и с помощью которого идентифицируется то, или иное сообщение. Исходный k -разрядный двоичный код позволяет хранить в памяти телемеханического устройства 2^k различных сообщений, т.е. для представления сообщений можно использовать все возможные комбинации двоичного числа. Для представления N сообщений достаточно использовать число двоичных разрядов, равное:

$$k = \lceil \log_2 N \rceil,$$

где $\lceil a \rceil$ — обозначение ближайшего большего целого числа для числа a .

Например, при $N = 13$: $k = \lceil \log_2 13 \rceil = 3,7 \approx 4$, т.е. достаточно иметь четыре разряда. При этом, максимальное число возможных комбинаций четырех разрядного двоичного числа составляет: $2^4 = 16$. Следовательно, три комбинации двоичного числа, равные разности максимального числа возможных комбинаций и числа используемых сообщений, являются лишними и не используются для представления сообщений. Каждой комбинации значений двоичного числа соответствует его десятичный эквивалент, который определяется следующим образом. Допустим, например, что мы имеем k -разрядный исходный двоичный код в виде комбинации следующих переменных: x_{k-1}, \dots, x_1, x_0 , где каждая переменная может принимать только два значения: 0 или 1. Каждый разряд двоичного числа имеет свой «вес». Нулевому значению любой переменной соответствует вес, равный нулю, а единичному значению разряда соответствует десятичное 2^{k-1} число, значение которого зависит от номера разряда и равно. Десятичный эквивалент двоичного числа равен сумме весов всех разрядов, имеющих единичное значение. Так, например, двоичному 4-х разрядному числу 1001_2 (нижним индексом указывается основание системы счисления) соответствует десятичное число: $2^3 + 0 + 0 + 2^0 = 9$. Таким образом, каждому сообщению может соответствовать конкретное десятичное число, записанное в двоичной форме.

При передаче по каналу связи какого-либо сообщения, требуется без искажений передать и правильно принять соответствующее данному сообщению десятичное число, являющееся по своей сути порядковым номером данного сообщения, конкретное смысловое значение которого содержится под этим номером в перечне сообщений.

Кодирование сообщения, которое требуется передать по каналу связи, заключается в том, что в кодовую комбинацию помимо k разрядов исходного кода (так называемых информационных разрядов) дополнительно определенным образом включают r избыточных (контрольных) разрядов. В результате кодирования передаваемому сообщению будет соответствовать не k -разрядная комбинация значений исходного двоичного кода, а $(k + r)$ -разрядное двоичное число.

Так как при искажении любого разряда исходного кода изменяется сумма весов его разрядов, то, соответственно, изменяется и порядковый номер сообщения. Добавление же контрольных разрядов при кодировании сообщения позволяет на приемной стороне не только обнаружить искажение передаваемой кодовой комбинации, но при определенных условиях (в зависимости от используемого кода и числа искаженных разрядов) и исправить (восстановить) ее.

Процесс преобразования принятой кодовой комбинации в кодовую комбинацию исходного двоичного кода и есть суть декодирования (выделения сообщения). Для этих целей составляются определенным образом проверочные соотношения между переменными информационных и контрольных разрядов, которые представляют собой аналитические формулы. Количество проверочных соотношений определяется количеством контрольных разрядов. Их значения вычисляются на основе принятых разрядов кодовой комбинации. Результаты проверочных соотношений рассматривают, как разряды двоичного числа, называемого синдромом. По значению синдрома можно судить не только о характере искажения, если оно имеется, но и о номере конкретного разряда, в котором произошло искажение.

Рассмотрим различные способы кодирования сообщений (информации) и принципы их декодирования на конкретных примерах.

Коды, позволяющие обнаружить и исправить ошибки в кодовых комбинациях, называются помехозащищенными или корректирующими кодами. Они делятся на две группы: коды с обнаружением ошибок и коды с обнаружением и исправлением ошибок.

При наличии m ошибок в принятой кодовой комбинации, последняя отличается от переданной значениями m переменных или, что одно и то же, значениями m разрядов.

Минимальное число d элементов, в которых одна кодовая комбинация двоичного кода отличается от другой (по всем параметрам кодовых комбинаций) называется минимальным кодовым расстоянием d_{\min} данного кода. В помехозащищенных кодах, позволяющих обнаружить факт искажения принимаемых кодовых комбинаций при наличии m и менее любых ошибок, минимальное кодовое расстояние между всеми парами используемых (входящих в число разрешенных) кодовых комбинаций должно быть на единицу больше числа ошибок, т.е.: $d_{\min} \geq m + 1$. Очевидно, что в этом случае искаженная кодовая комбинация будет входить в состав запрещенных для использования комбинаций и отличаться от любой разрешенной кодовой комбинации хотя бы в одном разряде, и благодаря этому обнаруживаться. Поэтому принцип обнаружения ошибок при декодировании заключается в проверке кодового расстояния d принятой комбинации кода. По отношению к разрешенным комбинациям, оно должно быть не менее минимального кодового расстояния: $d \geq d_{\min}$.

Кодовое расстояние d между двумя любыми комбинациями двоичного кода легко определяется путем подсчета числа единиц, получаемых при сложении одноименных разрядов этих комбинаций по модулю 2.

Допустим, необходимо определить кодовое расстояние двух комбинаций значений четырех разрядного кода, например: 1001_2 и 0101_2 . Произведем их поразрядное сложение по модулю 2: $1001_2 \oplus 0101_2 = 1100_2$. Из полученного результата сложения следует, что искомое число единиц равно 2, т.е. $d = 2$.

Допустим, что все комбинации с кодовым расстоянием 2 и более относятся к разрешенным комбинациям, но в одной из них при передаче произошло искажение одного разряда, например, вместо 0101_2 на приемной стороне получили 0001_2 . Применяя к предыдущему примеру сложение по модулю 2, получим: $1001_2 \oplus 0001_2 = 1000_2$. Следовательно, принятая кодовая комбинация по отношению к одной из разрешенных имеет минимальное кодовое расстояние, равное 1, поэтому не может относиться к числу разрешенных комбинаций и является ошибочной. Однако указать номер разряда, где произошла ошибка, и восстановить его значение путем замены ошибочного на противоположное могут не все помехозащитные коды. Для этих целей служат корректирующие коды, позволяющие не только обнаружить ошибку, но и исправить (откорректировать) ее.

Особенность построения кодовых комбинаций корректирующего кода заключается в том, что в состав разрешенных комбинаций должны входить лишь такие, которые имеют по отношению друг к другу минимальное кодовое расстояние не менее чем $(m + s + 1)$, т.е.: $d_{\min} \geq (m + s + 1)$, где s — число исправляемых ошибок; $m \geq s$ — число обнаруживаемых ошибок. Таким образом, чтобы обнаружить, а затем исправить единичную ошибку необходимо иметь d_{\min} , равное 3. Например, имеем две разрешенные кодовые комбинации: 1001_2 и 0111_2 . Произведем их сложение по модулю 2: $1001_2 \oplus 0111_2 = 1110_2$, откуда следует, что они имеют $d_{\min} = 3$. Допустим, при передаче второй комбинации произошла ошибка в ее младшем разряде, т.е. принята комбинация 0110_2 . Осуществим поочередное поразрядное сложение по модулю 2 разрешенных комбинаций с принятой: $0111_2 \oplus 0110_2 = 0001_2$, следовательно, $d = 1$; $1001_2 \oplus 0110_2 = 1111_2$, следовательно, $d = 4$. Затем находим ту, которая имеет с последней минимальное значение d , очевидно это комбинация 0111_2 . Наличие только одной единицы в полученной сумме по модулю 2 для данной комбинации указывает на то, что принятая кодовая комбинация искажена (реализуется функция обнаружения ошибки), а местонахождение ее в младшем разряде сум-

мы указывает на ошибку именно в младшем разряде принятой комбинации. Следовательно, для исправления искаженной кодовой комбинации следует заменить в ней значение младшего разряда на противоположное. В этом случае, сложение по модулю 2 исправленной и разрешенной комбинаций дает число, состоящее из одних нулевых разрядов: $0111_2 \oplus 0111_2 = 0000_2$. Число 0000_2 говорит о том, что искажение исправлено верно. Здесь исправленный разряд отмечен более жирным шрифтом.

Из рассмотренных примеров следует, что путем логического сложения по модулю 2 принятой комбинации с разрешенными, можно определить ее истинность или ложность. Первая имеет место, если имеется один нулевой результат сложения, а последняя — если, при каждом сложении хотя бы в одном из разрядов полученной суммы имеется единичное значение.

К числу кодов с обнаружением ошибок относится инверсный код (код Бауэра), представляющий собой разновидность кода с повторением, в котором в качестве контрольных разрядов повторяются разряды исходного кода. При этом общее число разрядов полученной кодовой комбинации увеличивается вдвое. Код Бауэра отличается от кода с повторением тем, что при нечетной сумме единиц в исходной комбинации, его проверочная часть, представляющая собой контрольные разряды инвертируется, а при четной сумме единиц — проверочная часть кода с повторением остается неизменной. Например, трехразрядная комбинация 010_2 исходного простого двоичного кода при использовании кода с повторением преобразуется к виду: $010\ 010_2$, а при использовании кода Бауэра имеет вид: $010\ 101_2$. В данном примере исходная кодовая комбинация содержит нечетное число единиц и, следовательно, три младших (контрольных) разряда при построении кода Бауэра инвертируются.

Код Бауэра имеет следующие характеристики:

- относительная избыточность кода R , равная отношению числа r контрольных разрядов к общей длине n кода, равной $(k + r)$, где k — число информационных разрядов (разрядов исходного простого двоичного кода на все комбинации):

$$R = \frac{r}{k + r} = \frac{k}{2 \cdot k} = 0,5;$$

- минимальное кодовое расстояние: $d_{\min} = 2$ при $k = 2$; $d_{\min} = 3$ при $k = 3$ и $d_{\min} = 4$ при $k = 4$.
- число обнаруживаемых ошибок: $m = d_{\min} - 1$, равно 1, 2 и 3 соответственно. При этом может обнаруживаться и большее число ошибок. Так, например, при $k = 2$ может быть обнаружено до 67% двойных ошибок, а при $k = 3$ — до 80% тройных и четвертных ошибок и все пяти- и шестикратные ошибки.
- максимальное число обнаруживаемых ошибок m при $s = d_{\min} - m - 1 = 1$, соответственно равно: 1 при $d_{\min} = 3$; или $m = 2$ при $d_{\min} = 4$.

Рассмотрим принцип построения инверсного кода. Допустим, что исходный код содержит m разрядов. Пронумеруем разряды инверсного кода следующим образом: $k_{m-1}, k_{m-2}, \dots, k_0, r_{m-1}, r_{m-2}, \dots, r_0$, где символом k обозначены разряды исходного кода (информационной части), а символом r — разряды контрольной части инверсного кода. Легко заметить, что значение любого j -го разряда контрольной части равно сумме по модулю 2 всех разрядов информационной части, за исключением j -го ее разряда: $r_j = k_{m-1} \oplus k_{m-2} \oplus \dots \oplus k_{j+1} \oplus k_{j-1} \oplus \dots \oplus k_0$. В соответствии с указанной формулой запишем следующие выражения для определения значений разрядов контрольной части восьмиразрядного инверсного кода:

$$\begin{aligned} r_0 &= k_3 \oplus k_2 \oplus k_1; \\ r_1 &= k_3 \oplus k_2 \oplus k_0; \\ r_2 &= k_3 \oplus k_1 \oplus k_0; \\ r_3 &= k_2 \oplus k_1 \oplus k_0. \end{aligned} \tag{1}$$

Полученные выражения (1) являются функциями алгебры логики (ФАЛ), записанными в аналитической форме. Данные выражения являются основой для синтеза схемы кодирующего устройства на соответствующих логических элементах.

Для синтеза схемы декодирующего устройства необходимо получить аналогичные ФАЛ для проверочных соотношений (синдрома), с помощью которых осуществляется обнаружение принятой с искажением кодовой комбинации и при возможности восстановление сообщения в виде кодовой комбинации, соответствующей исходному коду. Если левые и правые части каждого из четырех соотношений (1), определенных для принятой кодовой комбинации, равны, то можно утверждать, что принятая кодовая комбинация не имеет искажений. В результате исходная кодовая комбинация получается простым отбрасыванием контрольной части кода. Отсюда вытекает правило составления ФАЛ для разрядов синдрома в виде суммы по модулю 2 левой и правой частей соотношений (1):

$$\begin{aligned} i_0 &= r_0 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_1; \\ i_1 &= r_1 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_0; \\ i_2 &= r_2 \oplus k_3 \oplus k_1 \oplus k_0; \\ i_3 &= r_3 \oplus k_2 \oplus k_1 \oplus k_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Очевидно, что для принятой без искажения кодовой комбинации значения всех четырех разрядов синдрома (2) должны быть равны 0, т.е. $i_0 = i_1 = i_2 = i_3 = 0$, что вытекает из правила составления соотношений (1). Если, хотя бы один из разрядов синдрома не равен 0, то кодовая комбинация принята с ошибкой. Наличие только одного ненулевого разряда синдрома указывает на то, что ошибка произошла в соответствующем контрольном разряде кодовой комбинации. Если ошибка произошла в k_j разряде информационной части кодовой комбинации, то все разряды синдрома, содержащие данный информационный разряд, кроме i_j — го будут равны единице. Проверочные соотношения (2) являются ФАЛ и служат основой для синтеза декодирующего устройства.

Модифицированный код Бауэра является одной из разновидностей кода с повторением и отличается от последнего тем, что при нечетном количестве единиц в исходном коде инвертируются первые ($m - 1$) старших разрядов контрольной

части кода с повторением, а при четном — только последний младший разряд контрольной части кода с повторением. Так, например, при использовании восьмиразрядного модифицированного кода Бауэра кодовая комбинация кода с повторением $k_3k_2k_1k_0r_3r_2r_1r_0 = 1011\ 1011_2$ преобразуется в кодовую комбинацию $1011\ 0101_2$, а кодовая комбинация $1001\ 1001_2$ — в кодовую комбинацию $1001\ 1000_2$. Особенность этого кода заключается в том, что данный код не имеет комбинаций с одними нулями или единицами, что дает возможность проверять канал связи. Кроме того, данный код является самосинхронизирующимся кодом, при котором любой циклический сдвиг его комбинации не приводит к ложному появлению разрешенных комбинаций. Модифицированный код Бауэра имеет те же характеристики, что и инверсный код.

- относительная избыточность кода: $R = r/(k + r) = 0,5$;
- минимальное кодовое расстояние: $d_{\min} = 4$ при $k \geq 4$;
- число обнаруживаемых ошибок без исправления:

$$m = d_{\min} - 1;$$

- число обнаруживаемых и исправляемых ошибок:

$$m = s = 1 \text{ при } d_{\min} = 3;$$

- число обнаруживаемых и исправляемых ошибок:

$$m = 2 \text{ и } s = 1 \text{ при } d_{\min} = 4;$$

Аналитические выражения для определения значений контрольных разрядов кодирующим устройством имеют вид, аналогичный формулам для инверсного кода за исключением младшего разряда. Для восьми разрядного модифицированного кода Бауэра ($k = r = 4$) они принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} r_0 &= \overline{k_3 \oplus k_2 \oplus k_1} ; \\ r_1 &= k_3 \oplus k_2 \oplus k_0 ; \\ r_2 &= k_3 \oplus k_1 \oplus k_0 ; \\ r_3 &= k_2 \oplus k_1 \oplus k_0 . \end{aligned} \quad (3)$$

Соответственно, аналитические выражения для определения значений синдрома декодирующим устройством имеют вид:

$$\begin{aligned}
i_0 &= r_0 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_1; \\
i_1 &= r_1 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_0; \\
i_2 &= r_2 \oplus k_3 \oplus k_1 \oplus k_0; \\
i_3 &= r_3 \oplus k_2 \oplus k_1 \oplus k_0.
\end{aligned}
\tag{4}$$

В случае правильного приема кодовой комбинации, значения разрядов синдрома согласно выражениям (3) и (4) должны иметь следующие значения: $i_0 = i_1 = i_2 = i_3 = 0$. Наличие единичных значений синдрома, как и в случае применения инверсного кода, свидетельствуют о наличии ошибок: единичное значение только в одном из разрядов — ошибка в соответствующем контрольном разряде, который присутствует в уравнении разряда с единичным значением; три единичных значения — ошибка в соответствующем информационном разряде, значение которого не присутствует в разряде синдрома с нулевым значением; два или четыре единичных значений в синдроме — ошибка в двух и более разрядах.

Модифицированный код Бауэра нашел широкое применение в устройствах железнодорожной автоматики и телемеханики. Например, при передаче информации по каналам АЛС-ЕН в устройствах КЛУБ (комплексное локомотивное устройство безопасности), а также в унифицированной микропроцессорной системе автоматической блокировки АБ-УЕ.

Наряду с этим, среди корректирующих кодов наибольшее распространение на практике имеет код Хэмминга. Этот код позволяет исправлять все одиночные ошибки (при $d_{\min} = 3$), а также исправлять все одиночные ошибки и обнаруживать все двойные ошибки (при $d_{\min} = 4$), но не исправлять их. В качестве исходного кода берут простой двоичный код на все сочетания с числом информационных символов k , к которому добавляют r контрольных символов. Следовательно, общая длина кодовой комбинации будет равна: $n = k + r$. Рассмотрим последовательность кодирования и декодирования по Хеммингу.

При передаче кодовой комбинации по каналу связи может исказиться любой из ее n символов или не исказиться. Следовательно, для исправления одиночных ошибок декодирующее

устройство с помощью r контрольных разрядов должно распознавать $n+1$ событие, включая отсутствие искаженных символов. Это, очевидно, может быть обеспечено лишь в том случае, если каждому событию будет соответствовать своя строго определенная комбинация значений контрольных символов, т. е. при выполнении следующего неравенства:

$$2^r \geq n + 1 = k + r + 1. \tag{5}$$

По формуле (5) можно определить длину кода при заданном числе информационных или контрольных разрядов. Допустим, что число информационных разрядов исходного кода равно 4. Условие (5) выполняется при $r \geq 3$, так как $2^r - r = k + 1 = 2^3 - 3 = 5$.

Особенность построения кода Хэмминга заключается в том, что комбинация значений разрядов синдрома представляет собой двоичный код десятичного числа, указывающего номер разряда кодовой комбинации, в котором произошла ошибка. Для этого число разрядов синдрома должно быть равно числу контрольных разрядов, а сами контрольные разряды должны размещаться в кодовой комбинации на местах, кратных степени 2, т.е. на позициях 1, 2, 4 и т.д. Информационные разряды при этом располагаются на оставшихся позициях. Например, при семиразрядном коде Хэмминга ($k = 4, r = 3$) кодовая комбинация в общем виде будет выглядеть следующим образом:

$$r_1 r_2 k_4 r_3 k_3 k_2 k_1,$$

где k_4 — старший (четвертый) разряд исходной кодовой комбинации двоичного кода, подлежащего кодированию;

k_1 — младший (первый) разряд.

Значения контрольных разрядов в коде Хэмминга определяются кодирующими устройствами по следующим уравнениям:

$$\begin{aligned}
r_1 &= k_4 \oplus k_3 \oplus k_1; \\
r_2 &= k_4 \oplus k_2 \oplus k_1; \\
r_3 &= k_3 \oplus k_2 \oplus k_1.
\end{aligned}
\tag{6}$$

Значения разрядов синдрома кодовой комбинации для ее декодирования определяются по формулам:

$$\begin{aligned} i_1 &= r_1 \oplus k_4 \oplus k_3 \oplus k_1; \\ i_2 &= r_2 \oplus k_4 \oplus k_2 \oplus k_1; \\ i_3 &= r_3 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Если комбинация значений разрядов синдрома принятой кодовой комбинации равна нулю ($i_1 = i_2 = i_3 = 0$), значит, она принята без ошибок, в противном случае десятичный эквивалент двоичного кода синдрома $i_3 i_2 i_1$ равен номеру разряда кода Хэмминга, в котором произошла ошибка. Если ошибка произойдет в контрольном разряде, то двоичный код синдрома примет одно из следующих значений: 100_2 , 010_2 или 001_2 , что соответствует десятичным числам 1, 2 и 4, т.е. номерам месторасположения контрольных разрядов.

Модифицированный код Хэмминга с кодовым расстоянием $d_{\min} = 4$ получается добавлением к коду Хэмминга с кодовым расстоянием $d_{\min} = 3$ четвертого контрольного разряда r_4 , определяемого путем суммирования по модулю 2 всех разрядов исходного кода Хэмминга:

$$r_4 = r_1 \oplus r_2 \oplus k_4 \oplus r_3 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_1 = k_4 \oplus k_3 \oplus k_2. \quad (8)$$

Соответственно, значение четвертого разряда i_4 синдрома будет равно:

$$i_4 = r_4 \oplus k_4 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus r_1 \oplus r_2 \oplus k_1 \oplus r_3.$$

Код Хэмминга ($n = 8, r = 4$) обнаруживает все 1, 2, 5 и 6 кратные ошибки, 80% трех и четырех кратных ошибок и наиболее часто используется в системах передачи информации.

ПОСТРОЕНИЕ ЗАДАННОГО КОДА ДЛЯ ПЕРЕДАВАЕМОГО СООБЩЕНИЯ

Допустим, что в соответствии с заданием требуется передать по каналу связи сообщение, порядковый номер которого равен

10. Следовательно, двоичный код данного числа должен содержать четыре разряда, из которых разряды с весами 8 и 2 должны быть равны 1, а остальные — нулю. В результате получаем двоичный исходный код: 1010_2 , который подлежит кодированию заданным корректирующим кодом.

Пусть сумма двух последних цифр шифра — есть нечетное число 15, разлагаемое на два сомножителя 3 и 5. В соответствии с заданием для кодирования в этом случае необходимо использовать инверсный код. При кодировании инверсным кодом к исходному четырех разрядному коду следует добавить четырех разрядное двоичное число, состоящее из контрольных разрядов. Так как в исходном коде содержится четное число единиц, то в соответствии с приведенным ранее правилом построения инверсного кода контрольные разряды повторяют исходную кодовую комбинацию: 1010_2 . Таким образом, закодированное сообщение принимает вид восьми разрядного двоичного числа: $k_3 k_2 k_1 k_0 r_3 r_2 r_1 r_0 = 10101010_2$, которое необходимо передать по каналу связи.

Пусть сумма двух последних цифр шифра — есть нечетное число 13, неразлагаемое на сомножители (простое число), тогда в соответствии с заданием для кодирования следует использовать модифицированный код Бауэра. В соответствии с правилом его построения, следует в полученной ранее кодовой комбинации инверсного кода значение ее первого (младшего) разряда r_0 изменить на противоположное. В результате искомая кодовая комбинация примет вид: $k_3 k_2 k_1 k_0 r_3 r_2 r_1 r_0 = 10101011_2$.

Пусть сумма двух последних цифр шифра — есть четное число 12 и обе цифры — нечетные числа 7 и 5. В этом случае для кодирования следует использовать семиразрядный код Хэмминга. При построении семиразрядного кода Хэмминга необходимо определить значения контрольных разрядов в соответствии с аналитическими выражениями (6):

$$\begin{aligned} r_1 &= k_4 \oplus k_3 \oplus k_1 = 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1; \\ r_2 &= k_4 \oplus k_2 \oplus k_1 = 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0; \\ r_3 &= k_3 \oplus k_2 \oplus k_1 = 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1. \end{aligned}$$

Руководствуясь принципами построения кода Хэмминга, изложенными в предыдущем разделе, составим искомую кодовую комбинацию: $r_1 r_2 k_4 r_3 k_3 k_2 k_1 = 1011010_2$.

Если обе цифры шифра оказались четными числами, например, 8 и 4, то, как следует из задания, для кодирования следует использовать восьмиразрядный модифицированный код Хэмминга. Значения младших контрольных разрядов r_1, r_2, r_3 при этом также получают по формулам (6). Четвертый контрольный разряд получают по формуле (8): $r_4 = r_1 \oplus r_2 \oplus k_4 \oplus r_3 \oplus k_3 \oplus k_2 \oplus k_1 = 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 0$. Добавив его к ранее полученному семиразрядному коду Хэмминга, получим искомую восьмиразрядную кодовую комбинацию: $r_1 r_2 k_4 r_3 k_3 k_2 k_1 r_4 = 10110100_2$.

РАСЧЕТ КОРРЕКТИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ ЗАДАННОГО КОДА

Расчет производится для определения числа m обнаруживаемых и s исправляемых ошибок, которые могут возникнуть в процессе передачи кодовой комбинации по каналу связи. Расчет производится для каждого вида ошибок отдельно в соответствии с формулами, приведенными в задании 2 настоящих методических указаний:

$$s = d_{\min} - m - 1; m = (d_{\min} - s - 1) \text{ при } s \leq m;$$

$$m = (d_{\min} - 1) \text{ при } s = 0.$$

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОДИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА (КОДЕРА)

Как следует из формул 1, 3, 6, 8 для построения корректирующих кодов осуществляется расчет значений контрольных разрядов на основе значений информационных. Все перечисленные расчетные формулы содержат функцию сложения по модулю 2.

Функция у сложения по модулю 2 для двух переменных имеет вид: $y = x_1 \& x_2 + x_1 \& x_2$.

Используя правило де Моргана, преобразуем данную ФАЛ к виду, удобному для реализации ее на элементах И-НЕ:

$$y = \overline{x_1 \& x_2 \& x_1 \& x_2} \quad (9)$$

Структурная схема, соответствующая формуле (9) и реализующая логическую функцию сложения по модулю два двух переменных, представлена на рис. 16 а, а ее условное обозначение – на рис. 16 б. На рис. 16 в показана схема реализации многовходового логического блока, реализующего функцию сложения по модулю 2. В дальнейшем для упрощения изображения схем при использовании трех входов (x_1, x_2, x_3) и выхода $y_1 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3$ данный блок будем обозначать «R», при использовании всех четырех входов и выхода y_2 – «I».

Пусть требуется синтезировать схему кодера инверсного кода.

Для синтеза схемы кодера, позволяющей сформировать из исходного двоичного числа двоичную комбинацию в инверсном коде, воспользуемся формулами (1) вычисления значений контрольных разрядов.

Так как в каждую из формул входит по три переменных и две операции, для построения схемы кодирующего устройства ис-

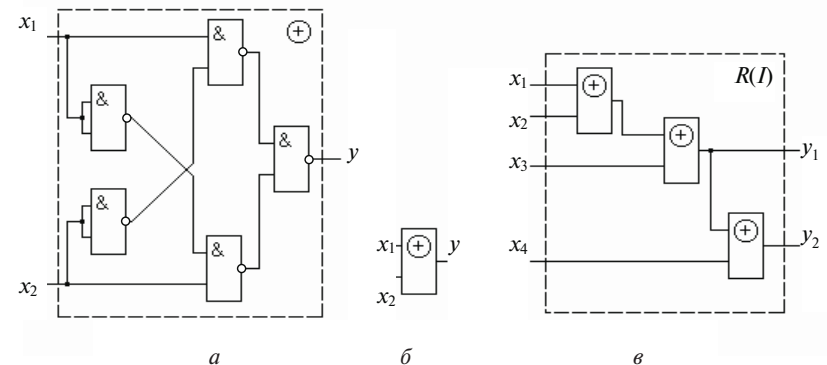


Рис.16. Схемы функции сложения по модулю 2:

а — структурная схема функции двух переменных; б — условное обозначение; в — многовходовый блок сложения по модулю 2

пользуем логический блок R , реализующий функцию y_1 сложения по модулю 2 для трех переменных. Его входы следует подключить к соответствующим разрядам исходного двоичного кода, а на выходе будет формироваться значение соответствующего контрольного разряда.

Один блок R позволяет вычислять значения только одного контрольного разряда, поэтому для построения кодирующего устройства необходимо использовать 4 блока R – по числу контрольных разрядов. Структурная схема синтезированного кодера для инверсного кода представлена на рис. 17.

Условно считаем, что исходное двоичное число (1010_2) хранится в регистре памяти РП, состоящим из четырех синхронных RS -триггеров. Триггер $T4$ хранит старший разряд исходного кода, а $T1$ – младший. На вход кодирующего устройства подается исходный код 1010_2 , а на выходе имеем кодовую комбинацию в инверсном коде – 10101010_2 . Для обеспечения синхронизации вывода разрядов кода сигналы с блоков R поступают на выход кодера через логические элементы $И$, на другой вход которых поступает сигнал, инверсный по отношению к синхросигналу. В результате элементы $И$ работают в качестве ключей, замкнутых при наличии логической 1 на одном из входов, и разомкнутых – при наличии на нем логического 0. При указанном на схеме включении логическая 1 на входы схем $И$ поступает при отсутствии синхросигнала на входе S триггеров, а логический 0 – при его наличии. Это исключает возможность изменения состояния выходов кодера во время передачи кода.

Структурная схема кодера для модифицированного кода Бауэра, представленная на рис. 18, построена соответственно на основе логических формул (3) и практически аналогична предыдущей схеме.

Отличие от схемы (рис. 17) заключается лишь в том, что сигнал с выхода блока R для формирования значения контрольного разряда r_0 должен предварительно инвертироваться до поступления на логический элемент $И$.

Структурные схемы кодеров для кода Хэмминга представлены: для семиразрядного кода на рис. 19 и восьмиразрядного – на рис. 20.

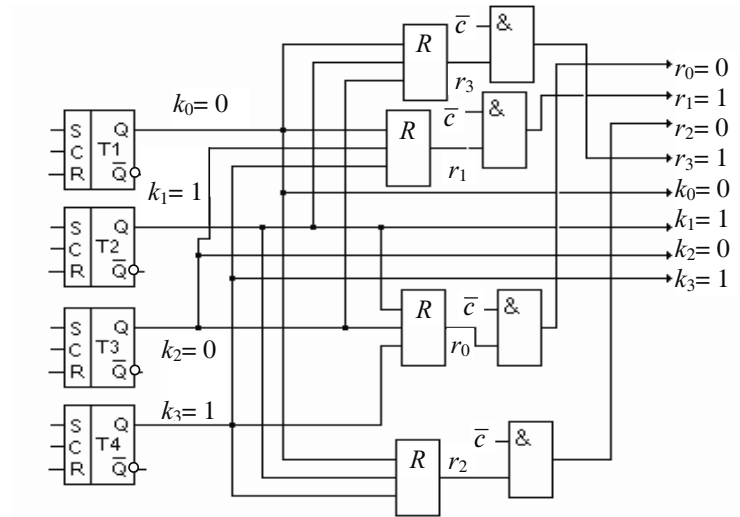


Рис. 17. Структурная схема кодера для инверсного кода

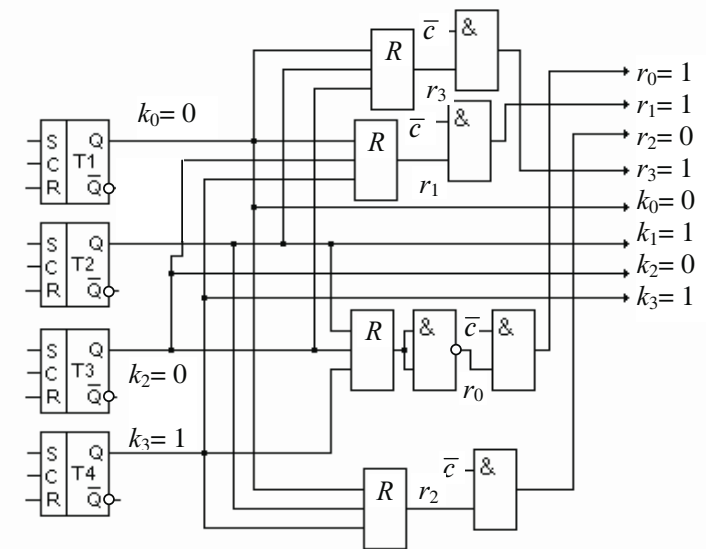


Рис. 18. Структурная схема кодера для модифицированного кода Бауэра

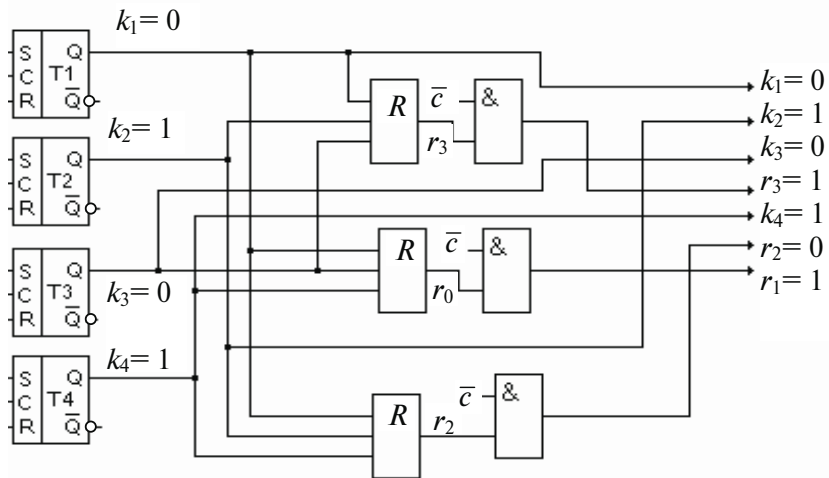


Рис. 19. Структурная схема кодера для семиразрядного кода Хэмминга

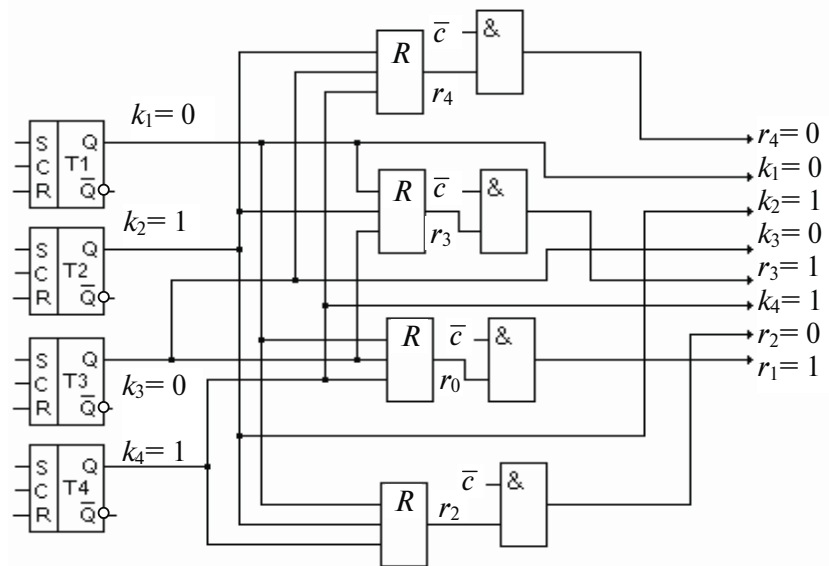


Рис. 20. Структурная схема кодера для восьмиразрядного кода Хэмминга

Структурная схема кодера семиразрядного кода построена на основе логических формул (6). Структурная схема кодера для восьмиразрядного кода Хэмминга построена по формулам (6) для вычисления значений первых трех контрольных разрядов и формулы (8) для определения дополнительного четвертого контрольного разряда.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ДЕКОДИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА (ДЕКОДЕРА)

Для построения структурной схемы декодера необходимо использовать полученные ранее логические функции синдромов. Рассмотрим синтез структурной схемы декодера для семиразрядного кода Хэмминга, используя для этой цели соотношения (7). Декодер должен иметь три выхода по числу разрядов синдрома и семь входов по числу разрядов принятой кодовой комбинации. Логическая схема декодера содержит регистр памяти РП, который состоит из семи синхронных RS-триггеров, семи входных инверторов на элементах И-НЕ для формирования сигналов управления триггерами и три логические схемы I , реализующие функцию сложения по модулю 2 четырех переменных в соответствии с формулами (7). Значение выходного сигнала каждой схемы I однозначно определяет значение соответствующего разряда синдрома. На рис. 21 представлена структурная схема искомого декодера для семиразрядного кода Хэмминга.

Для проверки функционирования схемы декодера следует задаться последовательно искажением одного из информационных разрядов и одного из контрольных разрядов и проверить возможность обнаружения и исправления ошибок на основе полученных значений синдромов на выходе декодера.

Рассмотрим для примера случай, когда в результате воздействия помех исказился шестой (информационный) разряд передаваемой кодовой комбинации $u_6 = k_1$ (нумерация разрядов кода в нашем случае ведется слева направо, начиная с единицы), в результате чего на вход декодера вместо закодированного

сообщения 1011010_2 поступило ложное сообщение 1011000_2 . В соответствии с логическими формулами (7) разряды синдрома на выходе декодера примут следующие значения:

$$i_1 = 1 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 0 = 0;$$

$$i_2 = 0 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 0 = 1;$$

$$i_3 = 1 \oplus 0 \oplus 0 \oplus 0 = 1.$$

Таким образом, на выходе декодера мы получили кодовую комбинацию синдрома в двоичном коде: $i_3 i_2 i_1 = 110_2$, что соответствует десятичному числу: $2^2 \cdot 1 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 0 = 4 + 2 + 0 = 6$, которое указывает номер искаженного разряда (при вычислении десятичного числа необходимо иметь в виду, что индекс старшего разряда двоичного кода синдрома имеет больший номер). Действительно в ложном сообщении был искажен шестой разряд $u_6 = k_1$ и декодер его правильно определил.

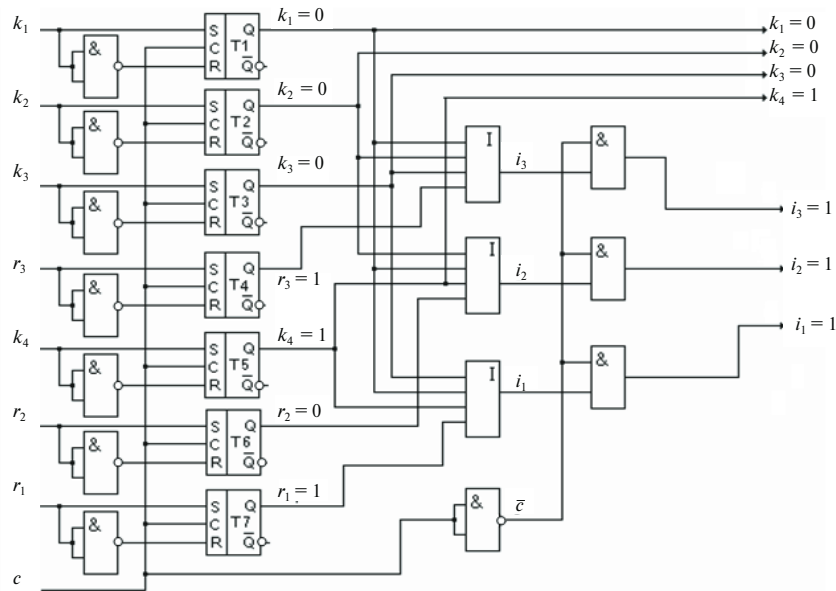


Рис. 21. Структурная схема декодера для семиразрядного кода Хэмминга

Таким образом, добавив к декодеру логическую схему преобразования двоичного числа в десятичный унитарный код (сигнал в преобразователе унитарного кода появляется только на одном из десяти выходов схемы, каждый из которых связан с определенным значением одноразрядного десятичного числа), мы можем исправить искаженный разряд кодовой комбинации в случае, если имеется хотя бы один ненулевой разряд в синдроме. Значения разрядов принятой кодовой комбинации и синдрома представлены применительно к рассмотренному выше случаю искажения сигнала.

Рассмотрим теперь случай искажения контрольного разряда, например, четвертого символа $u_4 = r_3$ той же кодовой комбинации, в результате чего на вход декодера поступит ложная комбинация в виде двоичного числа 1010010_2 . В соответствии с логическими формулами (7) разряды синдрома на выходе декодера примут, соответственно, значения:

$$i_1 = 1 \oplus 1 \oplus 0 \oplus 0 = 0;$$

$$i_2 = 0 \oplus 1 \oplus 1 \oplus 0 = 0;$$

$$i_3 = 0 \oplus 0 \oplus 1 \oplus 0 = 1.$$

Следовательно, на выходе декодера будет иметь место двоичное число $i_3 i_2 i_1 = 100_2$, соответствующее десятичному числу 4, указывающему, что декодер выявил искажение ее четвертого символа u_4 , которое действительно имело место в процессе передачи кодовой комбинации по каналу связи.

Недостаток рассмотренного семиразрядного кода Хэмминга заключается в том, что по значению синдрома нельзя определить, то ли произошла одна ошибка и ее следует исправлять, то ли имеет место несколько ошибок в кодовой комбинации и исправить ее невозможно. Это связано с тем, что значения синдромов представляют собой простой трехразрядный код на все сочетания, вследствие чего при нескольких искажениях получается искаженная кодовая комбинация значений синдрома, которая не отражает уже истинный номер искаженного разряда. Поэтому данный код целесообразно использовать в каналах связи с преимущественно одиночными ошибками.

Восьмиразрядный код Хэмминга имеет избыточный разряд синдрома, который позволяет отличать одиночную ошибку от нескольких и поэтому является более эффективным. При наличии всех нечетных искажений восьмиразрядного кода Хэмминга (одиночная, тройная и т.д. ошибки) разряд $i_4 = 1$, при всех четных (двойная, четверная и т.д. ошибки) разряд $i_4 = 0$. Поэтому при наличии в синдроме разряда $i_4 = 1$, по значениям разрядов $i_1 - i_3$ определяется место одиночного искажения способом, аналогичным семиразрядному коду Хэмминга, а в последующем осуществляется его исправление. При значении разряда $i_4 = 0$ и хотя бы одном $i_1 \div i_3 \neq 0$ принятая кодовая комбинация отбрасывается как имеющая более одной ошибки.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕКТИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ СИНТЕЗИРОВАННОГО ДЕКОДЕРА




Исследование корректирующих способностей синтезированного декодера следует проводить в лабораторном компьютерном классе с использованием ПЭВМ на которых установлен пакет моделирования «Simulink» среды «Matlab system». Данный пакет применяется при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплине «Теоретические основы автоматизации, телемеханики и связи».

Студент должен, используя инструментальные средства программы «Simulink», построить и испытать на ПЭВМ модели разработанных схем кодера и декодера.

При построении кодера соответствующего заданию корректирующего кода сначала следует синтезировать формирователь исходного простого кода. Его рекомендуется строить с помощью блоков «Constant» (см. элемент №5 табл.3) с уровнем выходного сигнала, равным 1, логических блоков «Logical Operator» (см. элемент №1 табл. 4), настроенных на реализацию логической функции «NOT» (функция инверсии), и двухпозиционных переключателей «Manual Switch» (см. элемент №2 табл. 4), взятых по количеству информационных разрядов исходной простой кодовой комбинации. Для построения самого кодера в

качестве логических блоков R рекомендуется использовать логические блоки «Logical Operator», настроенные на соответствующее число входов и реализацию логической функции «XOR» (исключающее ИЛИ), по числу контрольных разрядов.

Таблица 4

№ п/п	Обозначение блока	Название блока
1	 Logical Operator	Элемент, реализующий основные логические операторы (NOT, AND, OR, NOR, NAND)
2	 Manual Switch	Ручной переключатель
3	 Display	Индикатор, отображающий значение сигнала на входе

Для индирования полученной кодовой комбинации корректирующего кода можно использовать цифровые индикаторы «Display» (см. элемент №3 табл. 4) в соответствии с количеством ее разрядов или два аналоговых осциллоскопа «Scope» (см. элемент №3 табл. 3) с количеством входов, соответствующим числу информационных или контрольных разрядов кода. На рис. 14 представлен пример, иллюстрирующий возможное построение части кодера для одного информационного разряда k и контрольного разряда r .

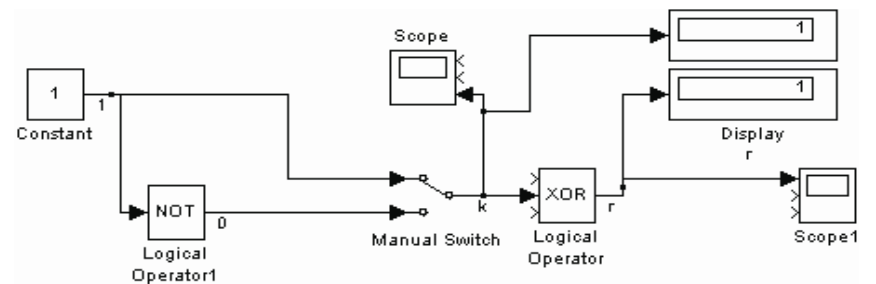


Рис. 22. Пример построения элементов кодера

Двойным щелчком по изображению соответствующих двухпозиционных переключателей «Manual Switch» необходимо переключить их таким образом, чтобы на входах кодера формировались требуемые в соответствии с пунктом 2 задания 2 значения разрядов исходного простого кода.

Сформированные при моделировании работы кодера значения разрядов комбинации корректирующего кода следует сравнить с полученными расчетным путем.

Модель структурной схемы декодера строится аналогичным образом. Входные сигналы всех разрядов кодовой комбинации на приемной стороне можно формировать так, как показано на рис. 22, или использовать выходные сигналы кодера. В последнем случае следует предусмотреть возможность инвертирования выходных сигналов кодера с тем, чтобы иметь возможность моделировать искажение значений разрядов кодовой комбинации так, как показано на рис. 23 (инвертирован информационный разряд).

Для каждой комбинации сигналов на входе декодера определяются значения синдрома как аналитически, так и по показаниям индикаторов модели. Результаты исследования рекомендуется заносить в табл. 5. В качестве выводов дается оценка

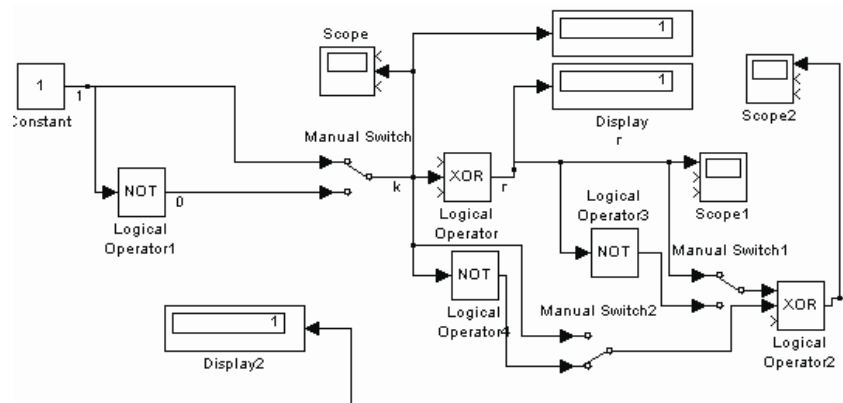


Рис. 23. Пример совместного построения элементов кодера и декодера

корректирующим возможностям спроектированного декодера. В пояснительной записке следует дать распечатку построенных на компьютере моделей структурных схем кодера и декодера в состоянии, соответствующем формированию и неискаженному приему заданной кодовой комбинации.

Допускается для моделирования использовать любую другую доступную стандартную программу моделирования дискретных устройств автоматики.

Примечание: в целях упрощения построения с помощью компьютерных программ имитационных моделей структурных схем кодера и декодера регистры памяти на триггерах и вспомогательные логические элементы типа «И», представленные на рис. 17 – рис. 21 использовать не обязательно.

Таблица 5

Наименование кода					
Модифицированный код Хэмминга					
Номер сообщения: 10			Исходный двоичный код: 1010 ₂		
Передаваемая кодовая комбинация: 10110100 ₂					
Принятая кодовая комбинация	Значение синдрома				Заключение
	i_1	i_2	i_3	i_4	
10110100 ₂	0	0	0	0	Сообщение принято без ошибок
10110000 ₂	0	1	1	1	Ошибка в 6-м символе
10100100 ₂	0	0	1	1	Ошибка в 4-м символе
10100000 ₂	0	1	0	0	Неразличимая двойная ошибка
Вывод: Модифицированный восьмиразрядный код Хэмминга позволяет обнаруживать двойные и исправлять одиночные ошибки					

(счет символов в кодовой комбинации кода Хэмминга осуществляется слева направо).

Примечание: для семиразрядного кода Хэмминга столбец синдрома i_4 следует удалить.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ,
ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ

Рабочая программа и задание на курсовую работу
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

Тип.зак.	Изд.зак. 143	Тираж 900 экз.
Подписано в печать 18.04.08	Гарнитура Newton	Формат 60 × 90 ¹ / ₁₆
Усл.печ.л. 4,0		

Издательский центр и Участок оперативной печати
Информационно-методического управления РГОТУПС,
125993, Москва, Часовая ул., 22/2